



TITLE:

交流・直流超高圧OFケーブルの絶縁性能向上に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

安藤, 順夫

CITATION:

安藤, 順夫. 交流・直流超高圧OFケーブルの絶縁性能向上に関する研究. 京都大学, 1981, 工学博士

ISSUE DATE:

1981-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r4529>

RIGHT:

交流・直流超高圧 O F ケーブルの
絶縁性能向上に関する研究

昭和 56 年 4 月

安 藤 順 夫

内 要 梗 概

都市部を中心とした電力需要の伸びは著しく、遠隔地の大規模発電所から都市内部に至る長距離大容量送電線路が不可欠となり、これに伴って地中送電ケーブルの超高圧大容量化が要請される。この要請に応えるには、都市部の地中送電網建設用としての275 kV OFケーブルの絶縁性能の向上と500 kV OFケーブルの開発が必要であり、また将来の発電所のより一層の遠隔化を予測して長距離送電用直流ケーブルの開発も必要となる。

本論文は、上記の技術的背景のもとに行なった都市内導入用275 kV OFケーブル、大容量送電用500 kV OFケーブル、及び250 kV、500 kV 直流OFケーブルの絶縁性能向上のための研究成果を述べるものである。

第1章では、緒言として交流・直流超高圧OFケーブルの絶縁性能向上の必要性と研究課題、及び研究方向の概要を述べる。

第2章では、超高圧OFケーブルの絶縁設計の基本的問題を見直し、絶縁体の誘電体損の低減と絶縁耐力の向上を主眼として段絶縁設計を検討している。さらに、その効果を275 kV OFケーブルで実証するとともに、500 kV OFケーブルを設計、試作し、接続部を含めた総合的な研究を実施し、超高圧OFケーブルの技術的問題の解決をはかり、その実用線路への適応可能性を評価している。

第3章では、直流ケーブルの絶縁設計上、交流ケーブルの場合と異なる固有の問題点について考察を行ない、合理的な直流ケーブル設計のための解決策を探る。これら解決策の具体的効果を250 kV 直流OFケーブルを用いて明らかにした後、将来の長距離大容量送電用500 kV 直流OFケーブルをとりあげ、その絶縁性能を検討し、とくに異常電圧重畳現象に関する研究を加え、直流ケーブルの設計手法の確立をはかっている。

第4章では、超高圧大容量交流・直流ケーブルの絶縁性能を正しく評価し、信頼性の向上をはかるため電力ケーブルの熱破壊現象について考察し、熱破壊発生条件を導き、この結果を用いて超高圧ケーブルの運転中あるいは試験中の熱的問題の重要性を検討している。

第5章では、超高圧ケーブルを安全かつ効率良く運用し、大容量送電を可能にするにはケーブルの温度上昇と排熱手法が重要となることから、変動負荷に対するケーブルの温度上昇及び強制冷却下でのケーブル温度分布に関する解析手法を導き、その妥当性を明らかにしている。

記 号 表

- a : 油浸紙積層絶縁に於ける絶縁紙層の比率
- b : 油浸紙積層絶縁に於ける油隙層の比率
- C : ケーブル静電容量 ($\mu\text{F}/\text{km}$)
- C_1 : 油浸紙積層絶縁に於ける絶縁紙層の静電容量 (μF)
- C_2 : 油浸紙積層絶縁に於ける油隙層の静電容量 (μF)
- C_h : 段絶縁設計時の h 段目の静電容量 ($\mu\text{F}/\text{km}$)
- C_w : 冷却水の比熱 ($\text{watt} \cdot \text{sec}/(\text{°C} \cdot \text{cm}^3)$)
- C_g : 土壌の比熱 ($\text{watt} \cdot \text{sec}/(\text{°C} \cdot \text{cm}^3)$)
- D_h : 埋設ケーブル h 番目管路の径 (mm)
- D' : 土壌部熱等価回路定数決定のための等価埋設径 (mm)
- E_o : ケーブル絶縁体中の電界強度 (kV/mm)
- E_B : 絶縁破壊時のケーブル絶縁体中の最大電界強度 (kV/mm)
- E_h : 段絶縁設計時の h 段目の電界強度 (kV/mm)
- E_{DC} : 直流電圧課電時の電界強度 (kV/mm)
- E_p : 直流電圧に異常電圧が重量した場合の電界強度 (kV/mm)
- E_{sg} : 異常電圧課電時の電界強度 (kV/mm)
- f : 交流商用周波数 (Hz)
- G : ケーブル絶縁体のコンダクタンス ($1/(\Omega \cdot \text{cm})$)
- g : 土壌固有熱抵抗 ($\text{°C} \cdot \text{cm}/\text{watt}$)
- H : ケーブルからの放散熱量 (watt/cm)
- K_h : 埋設ケーブル熱等価回路の h 段目の熱容量 ($\text{watt} \cdot \text{s}/(\text{°C} \cdot \text{cm})$)
- k : ケーブル絶縁体熱伝導度 ($\text{watt}/(\text{°C} \cdot \text{cm})$)
- $L_{I \sim M}$: 強制冷却方式に於ける長さ方向区間距離 (cm)
- l_h : 埋設ケーブル h 番目管路の埋設深さ (mm)
- l_{jh} : 埋設ケーブル j 番管路と h 番管路の離隔距離 (mm)
- l'_{jh} : 埋設ケーブル j 番管路と h 番管路鏡像との離隔距離 (mm)
- M_c : 導体部の熱膨脹速度 ($(\text{cm}/\text{h})/\text{cm}$)
- M_i : 絶縁体部の熱膨脹速度 ($(\text{cm}/\text{h})/\text{cm}$)
- N : 埋設ケーブルの管路本数
- P_c : 高油圧パイプ型 OF ケーブルの導体部油圧 ($\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$)
- P_p : 高油圧パイプ型 OF ケーブルのパイプ部油圧 ($\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$)

p : 演算子 (d/dt)
 Q : 蓄積電荷量 (coulomb)
 q_0 : 絶縁体半径方向流出油量 (cm^3/h)
 q_k : 強制冷却に於ける k 番冷却水管の流量 (cm^3/s)
 R_{ac} : 導体交流実効抵抗 (Ω/cm)
 R_{dc} : 導体直流抵抗 (Ω/cm)
 R_i : 絶縁体熱抵抗 ($^{\circ}C \cdot cm/watt$)
 R_{ii} : 埋設ケーブル i 番管路の温度上昇ポテンシャル係数 ($^{\circ}C \cdot cm/watt$)
 R_{ij} : 埋設ケーブル i, j 管路間の温度上昇ポテンシャル係数 ($^{\circ}C \cdot cm/watt$)
 R_j : ケーブル防蝕層熱抵抗 ($^{\circ}C \cdot cm/watt$)
 R_s : ケーブル表面放散熱抵抗 ($^{\circ}C \cdot cm/watt$)
 R_1 : 油浸紙積層絶縁に於ける絶縁紙層絶縁抵抗 (Ω)
 R_2 : 油浸紙積層絶縁に於ける油隙層絶縁抵抗 (Ω)
 r_k : 段絶縁設計時の k 段目の半径 (mm)
 $r.p.f$: radial power factor 半径方向誘電正接分布
 S : ケーブルコア半径方向油流抵抗 (kg/cm^2) $\cdot cm / (cm^3 \cdot h)$
 S_1 : ケーブル絶縁体部半径方向油流抵抗 (kg/cm^2) $\cdot cm / (cm^3 \cdot h)$
 S_2 : ケーブル防湿層半径方向油流抵抗 (kg/cm^2) $\cdot cm / (cm^3 \cdot h)$
 T : ケーブル温度 ($^{\circ}C$)
 T_a : ケーブル周囲基底温度 ($^{\circ}C$)
 T_c : ケーブル導体温度 ($^{\circ}C$)
 T_k : 埋設ケーブル熱等価回路に於ける k 段目の温度 ($^{\circ}C$)
 T_{wc} : 導体発生熱によるケーブル導体温度上昇 ($^{\circ}C$)
 T_{wg} : 絶縁体発生熱によるケーブル導体温度上昇 ($^{\circ}C$)
 T_{in} : 強制冷却冷却水入口温度 ($^{\circ}C$)
 T_{ex} : 強制冷却冷却水出口温度 ($^{\circ}C$)
 t : 時間 (s)
 $\tan \delta$: 絶縁体誘電正接 (添字は段絶縁設計時の段数を示す)
 U_1 : ケーブル導体部等価油容量 ($cm^3 / kg/cm^2$) cm)
 U_2 : 絶縁体部等価油容量 ($cm^3 / kg/cm^2$) cm)
 V : 電圧又は電位 (V)
 V_a : 試験用変圧器電源電圧 (V)
 V_b : 試験用共振型変圧器により試料に加わる電圧 (V)

V_{dc} : 直流課電々圧 (V)
 V_p : 直流電圧に異常電圧が重畳した場合のピーク値 (V)
 V_{sg} : 異常電圧ピーク値 (V)
 V_k : 段絶縁設計時の k 段目の分担電圧 (V)
 V_o : ケーブル導体課電々圧 (V)
 W : ケーブル発生熱量 (watt/cm)
 W_c : ケーブル導体発生熱量 (watt/cm)
 W_d : ケーブル誘電体損 (watt/cm)
 W_g : ケーブル漏洩電流損 (watt/cm)
 W_k : 埋設ケーブル熱等価回路に於ける k 段目の発生熱量 (watt/cm)
 Z_k : 埋設ケーブル熱等価回路に於ける k 段目の熱抵抗 (°C · cm / watt)
 α : 絶縁体絶縁抵抗の温度係数 (1 / °C)
 β : 絶縁体絶縁抵抗の電界係数 (mm / kV)
 τ_c : 導体部熱膨脹係数 ((cm³/°C) / cm)
 τ_i : 絶縁体部熱膨脹係数 ((cm³/°C) / cm)
 δ : 土壌熱拡散係数 (cm²/s)
 ϵ' : 比誘電率実数部 (添字は段絶縁設計時の段数を示す)
 ϵ'' : 比誘電率虚数部
 ϵ^* : 真空の誘電率 (F / m)
 θ_1 : 絶縁体誘電正接の高温部温度係数 (°C)
 θ_2 : 絶縁体誘電正接の低温部温度係数 (°C)
 λ_k : マトリックスの固有値
 ρ : 絶縁体固有絶縁抵抗 (Ω · cm)
 ρ_o : 絶縁体固有絶縁抵抗の 0 °C, 0 kV/mm での値 (Ω · cm)
 σ : 絶縁体の電気伝導度 (1 / (Ω · cm))
 σ_o : 絶縁体の電気伝導度の 0 °C, 0 kV/mm での値 (1 / (Ω · cm))
 τ : 絶縁体充電時定数 (s)
 τ_c : 変動負荷の繰り返し周期 (h)
 ω : 交流電圧の角速度 (= 2 π f)

交流・直流超高圧OFケーブルの絶縁性能向上に関する研究

目 次

第 1 章	緒 言	1
第 2 章	超高圧交流OFケーブルの絶縁設計と絶縁性能	
2.1	絶縁設計上の問題点とその解決法	3
2.2	段絶縁設計の採用とその効果	12
2.3	超高圧OFケーブルへの新材料、新段絶縁設計法の適用	17
2.4	275kV OF ケーブルによる実証研究	22
2.5	500kV OF ケーブルの絶縁性能	36
2.6	ま と め	49
第 3 章	直流UHV OF ケーブルの絶縁設計	
3.1	直流絶縁性能に関係する特異な問題点とその解決法	51
3.2	直流ケーブルの絶縁設計	62
3.3	250kV 直流OF ケーブルによる絶縁耐力の検討	68
3.4	500kV 直流OF ケーブルの絶縁性能	79
3.5	ま と め	98
第 4 章	電力ケーブルの熱破壊現象	
4.1	電力ケーブルの熱破壊理論の基本方程式とその解法	100
4.2	ケーブルの誘電率及び誘電正接の特性	103
4.3	熱破壊条件の理論計算と実験的検討	105
4.4	実布設ケーブルにおける熱破壊発生の可能性	111
4.5	超高圧直流ケーブルの熱破壊	112
4.6	ま と め	116
第 5 章	超高圧OFケーブルの温度上昇と強制冷却	
5.1	変動負荷に対するケーブルの温度上昇の理論解析	117
5.2	熱流等価回路の近似性	121

5.3	周期変動負荷に対するケーブル温度上昇	125
5.4	強制冷却の理論解析	131
5.5	ま と め	139
第 6 章	結 言	140
	謝 辞	141
	引 用 文 献	142
付録 I	超高圧 OF ケーブルの構造と寸法例	146
付録 II	高油圧パイプ型 OF ケーブルの負荷遮断時の絶縁体半径方向油圧降下 ...	148
付録 III	(3.11) 式の導出	159

第1章 緒 言

我国の国民生活の向上と産業の発展に伴ない、電力需要は著しい伸びを示し、発電設備並びに送電設備は急速に大型化してきた。

特に最近では大都市の集中的な電力需要をまかなうために都市内部に大電力を送り込むことが要請されるのに対し、発電所は立地問題から遠隔化、大型化し、その結果、長距離大容量送電線の建設と都市内部への導入が必要となった。このため我国の送電系統は超高压化され、500 kV による長距離、外輪系統と275 kV による都市導入系統が主体となってきた。これに対応して地中ケーブルの分野では、短距離変電所引出用として開発されていた275 kV OFケーブルの改良による都市内送電網への適用が急がれるとともに将来の大容量送電を確保するための500 kV OFケーブルの開発、及び発電所の遠隔化に備えた長距離UHV直流送電用ケーブルの開発が要請された。しかし、大容量基幹送電系統に使用されるこれら超高压ケーブルには非常に高い信頼性が必要となり、特に絶縁性能面において従来の技術では解決できない問題点が残されている。諸外国においても高電圧OFケーブルの開発が進められ、275 kV 未満のケーブルでは英国、米国の技術が先行し、我国はそれら技術を導入してきた。しかし、近年の欧米の電力需要の伸びは我国ほどには大きくなく、また都市形態が急激な超高压大容量化を必要としないこともあり、275 kV 以上のケーブルについてはその開発テンポが遅く、導入すべき技術は非常に少なくなってきた。このため、275～500 kV OFケーブルは我国独自の技術で開発しなければならない。

本文では以上の技術的背景をもとに超高压交流・直流OFケーブル開発上の問題点を摘出、解決し、絶縁性能の向上をはかり、上記要請に応え得るケーブルを開発しようとするものである。

まず、超高压交流OFケーブルにおいては、絶縁紙の特徴として誘電体損を下げるため絶縁紙の密度を下げると絶縁耐力が低下するという相反する特性を持っているので、これを克服し低損失でしかも長期間安定した絶縁性能を有する絶縁体の開発が強く望まれている。このためには、高気密度脱イオン水洗紙や合成絶縁油などの絶縁材料面の開発及び異なる誘電特性を持つ絶縁紙の組み合わせにより最適な絶縁体を得る設計手法の開発が必要である。

研究の第1ステップは絶縁材料と設計手法を改良し、これをおり込んだ試作ケーブルでその効果を確認することにより超高压送電網に適用可能な275 kV OFケーブルを開発することである。この成果をベースとして、より高い必要性能を満たすため絶縁材料と絶縁構成を探索することによりケーブル自体の性能向上をはかること、電圧上昇とともに大型化する傾向にある接続部をコンパクト化すること、及びこれらケーブルと接続部の総合的な試験によりその性能を実証すること等により500 kV OFケーブルの開発が可能となる。

次に、UHV 直流 OF ケーブルにおいては、絶縁体内の電位分布が絶縁抵抗により決定され、温度により変化すること、絶縁体中に空間電荷が蓄積され、これが絶縁性能に強く影響すること等の点でその絶縁特性は交流ケーブルの場合と極端に異なっている。また世界的に見てもその使用実績は少く、基礎的データが貯えられていない。したがって、まず絶縁体の絶縁抵抗、絶縁耐力、空間電荷及び電位分布等直流ケーブル特有の問題を把握し解決することが要点となる。すなわち、絶縁材料により上記問題に十分な検討を加えるとともに、250 kV 級直流 OF ケーブルにより解決策を求め、合理的な直流ケーブルの絶縁設計方法を導かなければならない。また500 kV 直流 OF ケーブルの場合には、特に直流運転電圧と異常電圧の両者に対しバランスのとれた絶縁設計が重要となるので、最適な直流ケーブル用絶縁紙の開発、及び異常電圧重畳時の絶縁耐力と系統保護レベルとの関係を把握することが研究の課題となる。

一方、超高圧交流・直流ケーブルの信頼性を維持し、大容量送電を可能にするには、単に電気的問題のみならず熱的問題も重視しなければならない。すなわち、ケーブルの過度の温度上昇は絶縁耐力の低下と発熱量の増大を惹き起こし、ケーブルの絶縁体に致命的な損傷を与える恐れがある。逆にケーブルの発熱を強制的に奪うことにより送電容量の大幅な増加が期待できる。したがってケーブルの熱破壊現象、変動負荷を考慮した温度上昇及び強制冷却の効果について実用ケーブルに適用できる解析手法を導くことは、超高圧ケーブルの安全でしかも効率良い運用とより一層の大容量化の実現を可能にすると考えられる。

本論文は、以上のような技術的課題に対し、新たな解析と考察を盛り込んだ理論的手法と各種試作ケーブルを用いた実験的手法とを併用して実施した超高圧交流・直流 OF ケーブルの絶縁性能向上のための研究内容をまとめるものである。

第2章 超高圧交流ケーブルの絶縁設計

2.1 絶縁設計上の問題点とその解決法

2.1.1 絶縁設計手法の基礎的考察

220 kV 以上の超高圧ケーブルは基幹送電系統に使用されており、その性能には高い信頼性が要求される。このため開発に当っては従来の高圧ケーブルの経験为基础として新たな検討を加え問題点を解決する必要がある。問題点の所在を明らかにするために超高圧ケーブルの絶縁設計の基本的な流れ図を示すと図 2.1 のようになる。

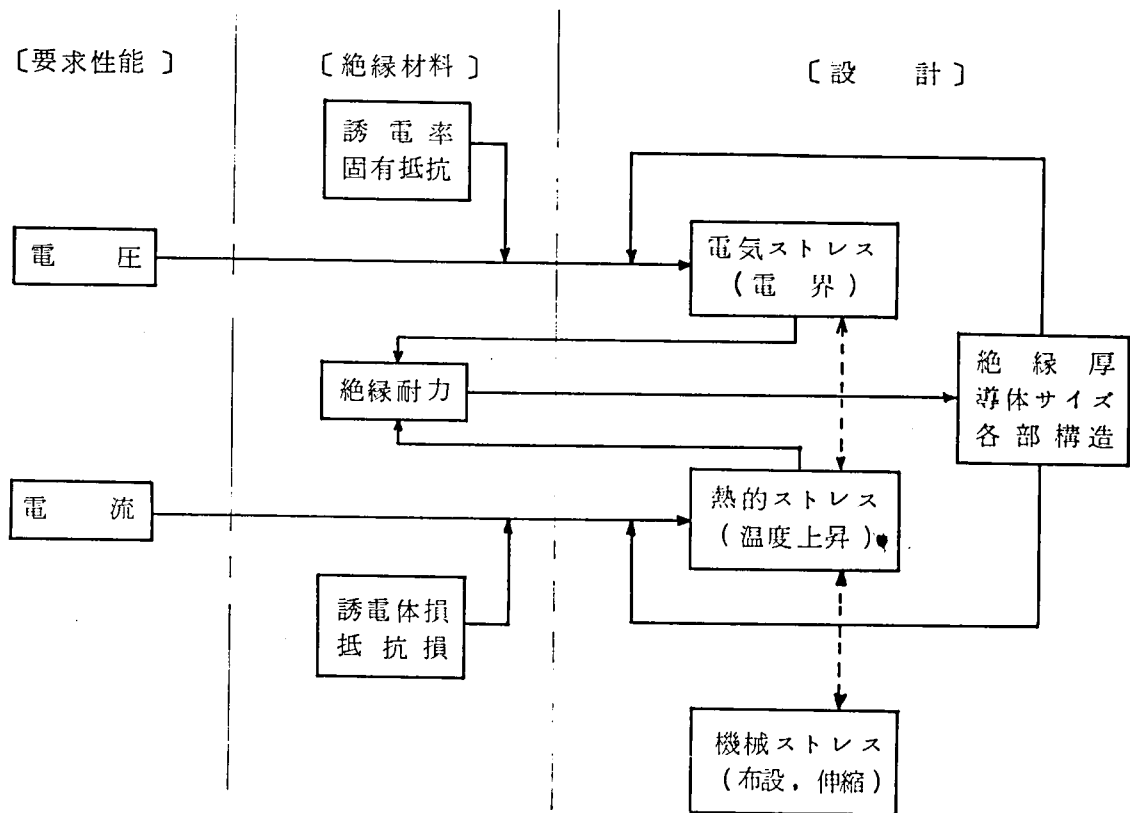


図 2.1 超高圧ケーブルの絶縁設計の基本的流れ図

一般に、所要ケーブルの電圧と電流（送電容量）が与えられると、使用絶縁材料の特性をもとに絶縁体中の電界や温度上昇が試算され、これが材料に許容される範囲内に納まるよう絶縁厚や導体の太さが決定される。ケーブルは同軸円筒状の単純構造であるが、その設計に当っては以下のような複雑な問題を抱えている。

電界には各部の寸法だけでなく誘電率 ϵ や固有絶縁抵抗 ρ が影響し、温度上昇には導体のジュール損と絶縁体の熱抵抗だけでなく、誘電体損やその他の発熱あるいは熱

抵抗が影響する。しかも電界と温度との間には材料の特性や許容値の点で相互に強い関連を有している。

したがって十分な性能を有する超高圧ケーブルを得るには絶縁体自体の改良による電氣的、熱的耐力の向上と発生ストレスの抑制及び材料の特性と種々の要因相互間の関連を考慮した絶縁設計手法の確立が必要となる。

なおケーブルの製造、布設及び運転を考えたとき、材料自体や完成したケーブルの機械的ストレスと強度は実用上の重要な問題であるが、本文の主旨からはずし、関連の大小に応じて適宜述べるにとどめることとする。

代表的な超高圧 OF ケーブルの構造と各部名称は付録 I に示したとおりである。

2.1.2 絶縁特性上の問題点

超高圧交流 OF ケーブルの絶縁設計上の問題点は、材料の特性に関するものと設計手法に関するものに分けられ、ここでは前者の問題点とその解決のための基本的検討事項を述べる。

(1) 絶縁耐力の向上

超高圧ケーブルは 30～40 年の長期に亘り運転電圧及び開閉サージ、雷サージ等の異常電圧に完全に耐えねばならない。送電系統では変電用機器と架空送電線の実用化が先行するのでケーブルを使用する段階では運転電圧や異常電圧レベルはすでに決定されている。絶縁設計の対象となる電圧は、実際の運転中に加わる交流運転電圧と基準絶縁強度 (BIL) に相当する雷サージ電圧、及び実用時に絶縁上の障害が生じないことを保証するための交流とインパルス試験電圧である。これら電圧はケーブルの公称電圧毎に規定されており¹⁾、公称電圧 154、275、500 kV についてまとめたものが表 2.1 である。

表 2.1 OF ケーブルの設計時に対象となる電圧

公称電圧 (kV) 電 圧 種 類	154	275	500
運 転 対 地 電 圧(kV)	88.9	158.8	288.7
商用周波異常電圧(kV)	216(2秒)	297(0.2秒)	396(0.2秒)
基 準 絶 縁 強 度(kV)	750	1050	1550
交 流 枠 試 験 電 圧(kV)	200	280	420
交 流 試 料 試 験 電 圧(kV)	300	420	630
イ ン パ ル ス 試 験 電 圧(kV)	900	1260	1860

一方、これらの電圧に対する絶縁体内の発生電界強度を求めると図 2.2 を得る。但し、図 2.2 は導体サイズ 1200 mm^2 を代表例とし、交流運転電圧及びインパルス耐電圧に対する絶縁体内最大電界強度（導体上電界強度）を示したものである。

154 kV と同程度の設計電界強度を採用すると、対インパルス設計に関しては、275、500 kV ケーブルとも実現可能な範囲におさまるが、対交流設計に関しては、絶縁厚が 28.2 (275 kV)、78.0 (500 kV) となり、275 kV ケーブルは実現できるが、500 kV ケーブルは輸送上の外径制限（約 170 mm）のため実現不可能となる。大容量送電に必要な導体サイズの上限（ 3000 mm^2 、外径約 70 mm）を考慮すると、500 kV OF ケーブルの絶縁厚は 30 mm 程度に抑えねばならず、交流運転時の電界強度として約 15 kV/mm を採る必要があり、これは 154 kV OF ケーブルの交流運転電界強度 8.3 kV/mm の約 1.8 倍に相当する。このとき、インパルス電界強度は約 1.1 倍（ $95.4/84.0$ ）にとどまる。

このように、送電電圧の超高压化にともない運転時の交流電界が非常に高くなるので、超高压 OF ケーブルの良好な絶縁性能を確保するには、使用する絶縁材料自体の絶縁耐力の向上をはかる必要がある。

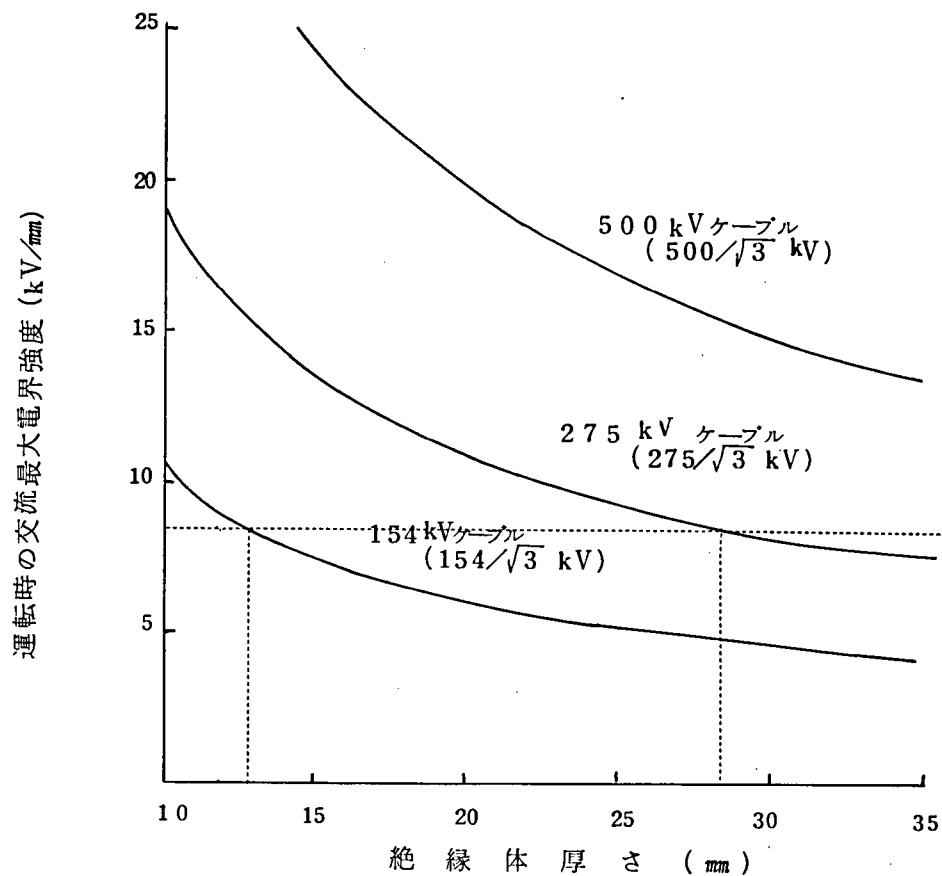
(2) 絶縁体の低損失化

電力ケーブルの送電容量は送電電圧と電流によって決定されるので大容量化を達成するには、通電可能な許容電流の増加も重要となることは言うまでもない。許容電流はケーブル各部の発熱による温度上昇によって決定され、ケーブルの発熱は主として、導体部のジュール損と絶縁体中の誘電体損からなっている。誘電体損は絶縁体に加る電圧の二乗に比例して増加するので、超高压 OF ケーブルに於ては絶縁体の誘電特性が送電容量に及ぼす影響は極めて大である。一例として、導体サイズ 1200 mm^2 の OF ケーブルの絶縁体誘電特性、 $\epsilon' \cdot \tan \delta$ （比誘電率×誘電正接）、による許容電流の変化を図 2.3 に示す。

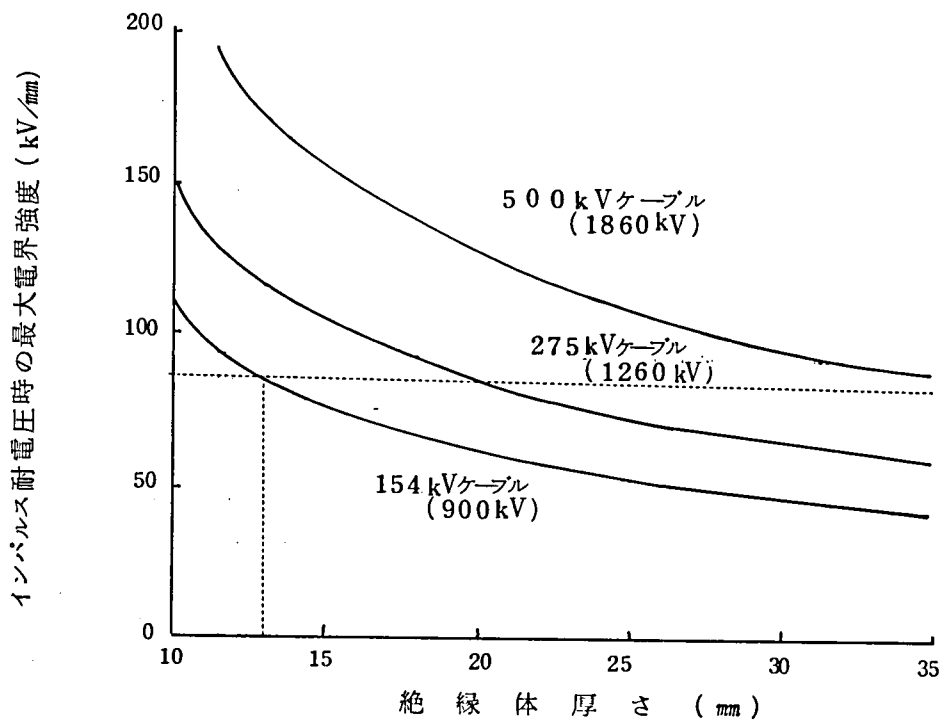
地中埋設条件は図 2.3 中の通りで、またケーブル構造は付録 I のとおりである。

従来の 154 kV 級 OF ケーブルの $\epsilon' \cdot \tan \delta$ は約 15×10^{-3} （ $= 3.7 \times 4 \times 10^{-3}$ ）であり、これをそのまま超高压ケーブルに適用すると 275 kV ケーブルの送電効率（誘電体損なしの場合の許容電流に対する比率）は約 75 % に低下し 500 kV ケーブルでは送電が不可能となる。このため誘電特性の改良が必要であり、送電効率を 80 % 以上に保つには各々の送電電圧に於て表 2.2 の $\epsilon' \cdot \tan \delta$ を得る必要がある。

これらの値を達成するには絶縁体を構成する材料、とくに絶縁紙の $\epsilon' \cdot \tan \delta$ を減少させる必要がある。



(a) 交流運転電圧に対する最大電界強度



(b) インパルス耐電圧時の最大電界強度

図 2.2 ケーブルの絶縁厚さと最大電界強度

(導体サイズ 1200 mm², その他構造は付録 I 参照)

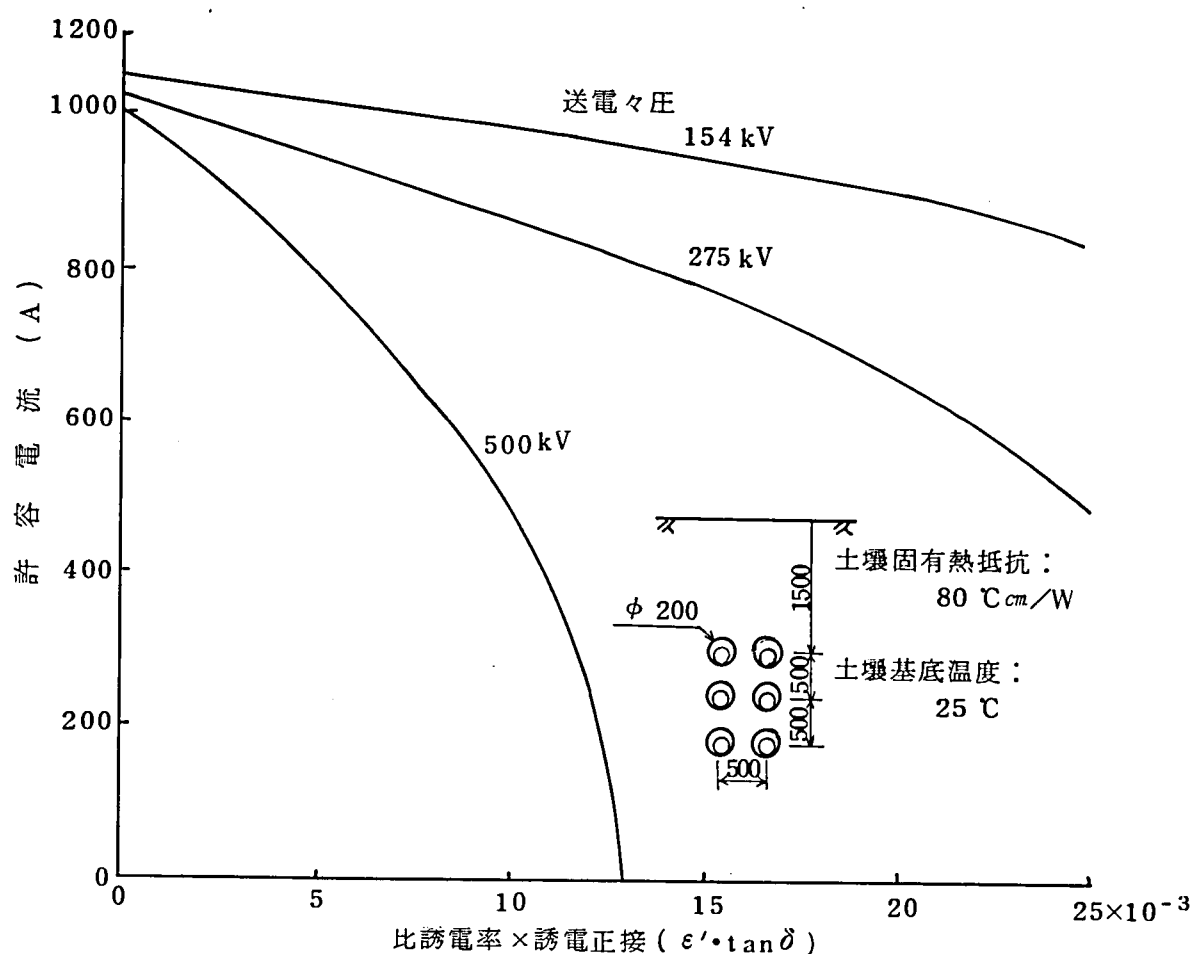


図 2.3 絶縁体の誘電特性による送電容量の変化

表 2.2 送電容量確保のために要求される $\epsilon' \cdot \tan \delta$

送電々圧 (kV)	$\epsilon' \cdot \tan \delta$
154	$< 2.5 \times 10^{-3}$
275	$< 1.2 \times 10^{-3}$
500	$< 5 \times 10^{-3}$

(3) 絶縁体の長期安定性

OFケーブルの絶縁体を構成する絶縁紙と絶縁油は、ケーブル運転中に加る熱的ストレス及び電氣的ストレスによる化学分解が進行し、劣化を生じる。この劣化は有機絶縁物を高温、高電圧下で使用するときに避けることのできない本質的な現象であり、変圧器やコンデンサの絶縁体の劣化と類似している。電力送電が開始された時点から研究され、現在もなお研究されている問題であるが、長年の実績を活用して劣化の基本的傾向は把握されている。

一般に熱による劣化は化学反応速度をもとに解析され、実用的な近似法則として油浸紙の場合“7～8℃半減則”が成り立つとされている²⁾。これは使用温度が7～8℃上昇すると寿命が半減することを意味している。

一方、電界による劣化は多数の実験データを基に検討が実施され、“n乗則”が導かれている³⁾。これは劣化量が(時間)×(電界)ⁿに比例することを意味し、局部電界の強い変圧器やボイド内放電をとまう油含浸ケーブルの場合にはn=9～10となるが運転状態でボイド内放電を生じることのないOFケーブルではnは極めて大きく(n=40～50)、また加える電界の強さによってはかえって熟成効果を生じることとも報告されている⁴⁾。

このため一般にOFケーブル用油浸紙材料自体は20 kV/mm 前後の交流電圧下での劣化が生じないとして取り扱われる場合もあるが、実用ケーブルには電氣的、熱的、及び機械的ストレスが重畳して加るためその長期劣化現象は極めて複雑となる。従来は電力需要の伸び、電圧の高圧化の傾向が緩慢であったため、試験採用しつつ新たなケーブルの性能を評価する期間がとり得たが急速な電力需要の伸びに対処するには開発時点で想定されるあらゆる要因に対し、30～40年の寿命に耐え得ることを確認しておく必要がある。

(4) その他の問題点

超高圧OFケーブル開発上の主要問題点と記述箇所については表2.3にまとめる。

表 2 3 超 高 圧 ケーブル 開 発 上 の 問 題 点

項 目	問 題 点	検 討 内 容 , 改 良 方 法 (記 述 章)
絶縁体の低損失化	絶縁体の誘電体損は電圧の2乗に比例して増大するため、超高圧ケーブルではこの損失を低減し、有効な送電容量を確保しなければならない。	油浸紙材料自体の誘電率、誘電正接の低減。 電氣的、機械的強度を勘案した材料の選択。 絶縁体の段絶縁設計手法の確立(第2章)
絶縁耐力の向上	ケーブル外径を押えるため、絶縁体に加わる電気ストレスが高くなる。運転電圧、試験電圧、異常電圧のレベル選定と、これらに耐え得る材料、設計手法を得る必要がある。	油浸紙材料自体の絶縁耐力の向上。 誘電正接低減とのバランス。 段絶縁設計による電界分布の緩和(第2章、第3章)
耐機械的ストレス 特性の向上	外径と重量が増大するため、機械的ストレスが大となる。絶縁体もこのストレスに耐え、紙切れ、紙しわを生じぬ特性を選択しなければならない。	絶縁紙自体の機械的強度の改良。 紙巻作業条件の確立。 運転中の機械的ストレスの解析と緩和(第2章)
長期安定性	種々のストレスを受け、絶縁体が劣化し、損傷を受ける危険がある。実用化が急がれるため、開発段階で長期安定性を確認しておく必要がある。	材料の劣化特性の確認。 実規模大ケーブルによる長期劣化特性の確認。 試作ケーブルによる長期安定性の検証。(第2章、第3章)
熱破壊現象	容量の増加と誘電体損の増大にともない、ケーブル温度が高くなり、熱的破壊を生ずる危険が大となる。	ケーブルへの熱破壊理論の適用と熱破壊要因の解析。 材料特性、製造条件の改良。 実線路を対象とした予測計算。(第4章)
ケーブル温度上昇	長期寿命の確保と熱破壊防止、及び容量増加をみたし安全且つ経済的な運用を行なうためのケーブル温度上昇の把握が必要となる。	過渡状態とくに変動負荷に対する温度上昇解析法。 実線路への適用、評価法の確立。 (第5章)
強制冷却手法	都市部の集中的電力需要に対処して、強制的に冷却した線路の増容量化が必要。その設計解析手法を確立しなければならない。	実線路に適用可能な強制冷却の解析方法及び設計手法の確立。 (第5章)

2.1.3 絶縁材料の改良

OFケーブルを構成する絶縁材料は、絶縁紙と絶縁油である。

以下、これら絶縁材料の改良の経過をまとめる。

(1) 絶縁紙

超高圧OF用絶縁紙として要求される特性のうち重要なものは、AC及びインパルス耐電圧強度、 ϵ' 及び $\tan\delta$ 、さらに紙巻構成上の機械強度である。これらは、絶縁紙のパルプ及び製造条件によって大きく左右され、その主な項目としては、密度、気密度、紙厚等がある。これら項目と上記諸特性の間には複雑な相互関係を有し、製紙メーカー等により詳細な検討が行なわれている⁵⁾。

各種特性と主な項目の関係の実測値を示すと図2.4を得る。

これらの図からの以下のことが明らかとなる。

- (i) ϵ' 、 $\tan\delta$ は絶縁紙の密度を下げることににより低下し得る。
- (ii) 絶縁耐力は密度を小さくする (ϵ' を小さくし油隙に加る電界が下るため) か、極端に大きくして放電路の阻止をはかることにより達せられるがその効果は小さい。気密度を上げることににより絶縁紙の繊維空間を少くし絶縁耐力を上げることでも可能である。
- (iii) 紙厚を薄くすれば、紙テープ間に生じる油隙が薄くなるので破壊強度が上がる。
- (iv) 一般に製紙工程で紙厚を薄くし、密度を上げることは容易であるが、これは ϵ' 及び $\tan\delta$ の増加につながるため限度がある。したがって極力低密度の状態でセルローズ繊維を微細化し気密度を上げる必要がある。
- (v) また、製紙時に使用する洗浄水に金属イオン等の不純物が混入しているとこれが吸着され、油浸紙の $\tan\delta$ を増大させる原因となるので、脱イオン洗浄水を使用しなければならない。
- (vi) さらにケーブル絶縁体構成上の大きい問題として、絶縁紙の機械的強度があげられる。製造、布設中の屈曲や運転中の熱伸縮に追随し、絶縁紙のしわや、紙切れを生じぬために絶縁紙の縦、横引張強度、伸び、表面摩擦係数、ヤング率などを一定範囲内に保つ必要がある。図2.4(v)では代表例として縦方向引張り強度を示したが、現在の紙巻技術で安定したケーブルを製造するには、最低5 kg/mm²の強度が必要となる。

以上のような特性、及び図2.4の各種依存性から従来の絶縁紙にかわる新たな特性の絶縁紙の改良をめざし、製紙会社に指示し、試作と試験を繰り返した。図中A系統、B系統は従来紙の系統の絶縁紙であったが、より一層の低損失化をめざして密度の低下をはかり、C系統、D系統に属する新たな絶縁紙を開発した。

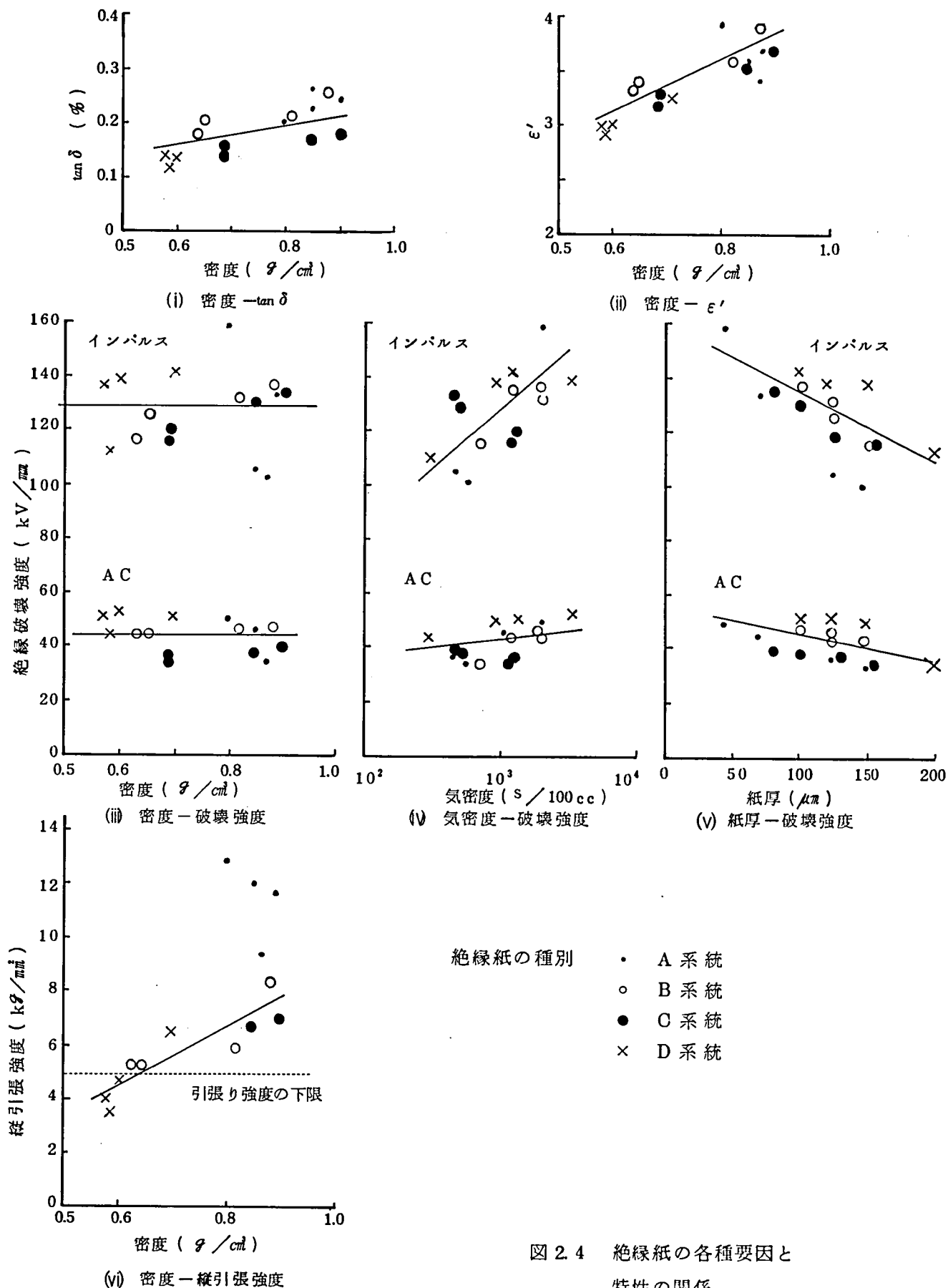


図 2.4 絶縁紙の各種要因と特性の関係

D系統の特性の絶縁紙は、ケーブル用絶縁紙の究極とも考えられるものであり、誘電特性、絶縁耐力特性は、従来紙と同等以上のものが得られている。しかし、図24(V)のように機械的強度が5%を下まわるものとなった。この新たな絶縁紙を用いてケーブルを試作し、試験したが引張り強度から許容される範囲内の張力での紙巻きではケーブルの最終的な電気、機械特性が満たされず断念せざるを得なかった。

このため、最終的にはB、C系統の絶縁紙を用いることとした。

(2) 絶縁油

従来のOFケーブルは石油を精製したいわゆる鉱油を採用していた。しかし、鉱油中には多種の高、低分子量の分子、及び硫黄を主とする不純物が含まれている。その量は微量であるため 鉱油使用ケーブルもその初期特性上は全く問題を生じていない。しかし、超高圧OFケーブルとしての信頼性と長期の安定性を考慮したとき、絶縁油についても新たな改良が必要となる。このため合成洗剤用原料として大量に合成生産され始めたアルキルベンゼン油に着目し、その特性を検討した。最終的には小サイズケーブルを試作し、その長期劣化試験を実施することにより、従来の鉱油より安定した特性を有することを確認した⁶⁾。

以上、材料面の研究により、油浸紙材料の低損失化、高絶縁耐力化及び長期安定性等の問題解決の見通しを得た。しかし、図2.4から明らかなように、いずれの特性も飛躍的な改良はなされておらず、とくに〔低損失化と高絶縁耐力化〕と〔低密度化—高密度高気密度化〕は製紙工程上互に矛盾する特性となり、さらに絶縁紙の機械強度の許容値を考慮したとき、超高圧ケーブルの絶縁性能の改良は、単に材料面の改良のみでは達成困難であり、これら材料の最適組み合わせによる絶縁設計手法の考察が重要となる。

2.2 段絶縁設計の採用とその効果

2.2.1 超高圧ケーブルの新段絶縁設計手法

先の図2.4(V)に示したように、絶縁紙の厚さを薄くすることによって破壊強度を向上できることは明らかであり、同軸円筒状の高電界の発生する導体側に薄紙を使用し外側に行くに従って厚紙を用いればケーブルとしての絶縁耐力が向上できる。このような段絶縁方式はすでに検討され、実用化されている⁷⁾。

しかし、超高圧ケーブルに発生する高ストレスに十分耐え得るには $40\mu m\sim 50\mu m$ の薄紙を使用しなければならず、これを導体側に使用するには紙じわの発生を防止するためケーブル巻き取り径、及び布設時の曲げ径を大とせざるを得ず、今後の超高圧OFケーブルの設計手法としては不适当である。このため、 $80\sim 100\mu m$ の絶縁紙の使用ですむような新たな設計方法を開発する必要がある。そこで新たな段絶縁方

式として、紙厚、誘電率、誘電正接の異なる油浸紙を組み合わせ、ケーブル絶縁体の全体特性として最良のものとする方式を考察する。その基本は

- (i) 導体側からシース側へ紙厚を厚くする。
- (ii) ただし、同一種の絶縁紙でなく誘電率は次第に小さく、誘電正接も次第に小さくする。

であり、これにより、最大電界の低減、ケーブル絶縁体の絶縁耐力の向上、及び誘電正接の低減が可能となる。以下、これを具体的に示す。

今、ケーブル絶縁体を n 層の油浸紙で構成し、各層の比誘電率 ϵ' 、誘電正接 $\tan \delta$ 、外径 r に各々添字 $1 \sim n$ を付して表わしたとき、 k 層中の電界は、 $r_{k-1} < r < r_k$ で

$$E_k(r) = \frac{V}{r \ln \left((r_1/r_0)^{\epsilon'_k/\epsilon'_1} (r_2/r_1)^{\epsilon'_k/\epsilon'_2} \dots (r_n/r_{n-1})^{\epsilon'_k/\epsilon'_n} \right)} \quad (2.1)$$

ただし r_0 : 導体遮蔽層半径

が成り立つ。 $k=1$ 、 $r=r_0$ の導体側最大電界は $\epsilon'_1 > \epsilon'_2 > \dots > \epsilon'_n$ のとき、すなわち導体直上層の誘電率を大きくすることにより緩和することができる。

また、静電容量と誘電正接は、各々次式により得られる。

$$C = \frac{1}{18 \ln \left[(r_1/r_0)^{1/\epsilon'_1} (r_2/r_1)^{1/\epsilon'_2} \dots (r_n/r_{n-1})^{1/\epsilon'_n} \right]} \quad (2.2)$$

$$\tan \delta = \frac{\sum_{k=1}^n \tan \delta_k \ln (r_k/r_{k-1})^{1/\epsilon'_k}}{\ln \left[(r_1/r_0)^{1/\epsilon'_1} (r_2/r_1)^{1/\epsilon'_2} \dots (r_n/r_{n-1})^{1/\epsilon'_n} \right]} \quad (2.3)$$

275 kV OF ケーブルを表 2.4 の 4 種の特性の異なる絶縁紙で構成した場合の例を以下に示す。

ケーブル A は、従来と同一方式の段絶縁方式を採用したものであり、同種絶縁紙の 4 種の厚さで構成している。

ケーブル B は、1 種の絶縁紙のみで構成したものである。

ケーブル C は、本文の考え方による新段絶縁方式を採用したもので、紙厚、誘電特性の異なる 4 種の絶縁紙で構成している。

表 2.4 275 kV O F ケーブルの構成例

項 目 ケーブル種類と構成	分割厚さ※ (mm)	紙 厚 (μm)	比誘電率	誘電正接
ケーブル A (従来の段絶縁方式)	1.0	70	3.9	0.0027
	2.0	100	3.9	0.0028
	7.0	125	3.9	0.0028
	9.5	150	3.9	0.0029
ケーブル B (均一絶縁方式)	19.5	125	3.40	0.0020
ケーブル C (新段絶縁方式)	2.0	100	3.90	0.0025
	2.0	125	3.60	0.0021
	6.5	125	3.40	0.0020
	9.0	150	3.30	0.0018

注) ※ 分割厚さは導体側からの分割厚さを示す

2.2.2 段絶縁設計の効果

表 2.4 の 3 種のケーブルについて、理論検討により新段絶縁の効果を検討する。

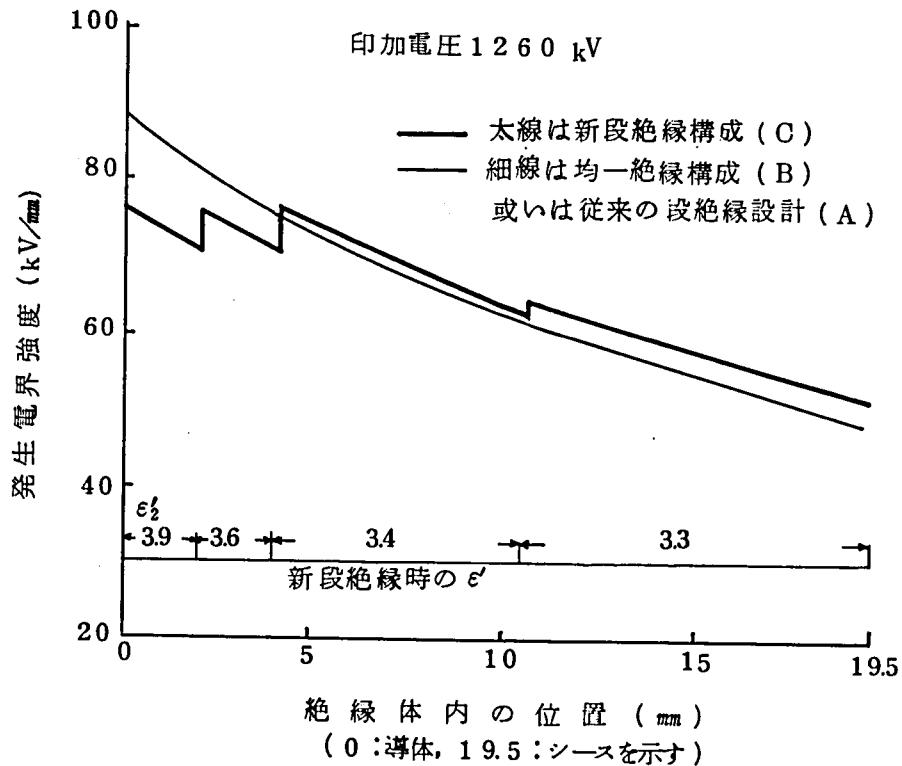


図 2.5 段絶縁設計による最大電界強度の緩和

(1) 絶縁体中の電界分布緩和と破壊電圧の向上

図 2.5 はケーブル絶縁体中の電界分布計算結果を示したものである。

A、B ケーブルは構成は異なるものの、誘電率は均一であるため電界分布上は全く変りない。

C ケーブルでは、導体側に誘電率の高い絶縁紙を使用したので明らかに発生電界は緩和されている。

3 種ケーブルの最大発生電界（印加電圧 1 2 6 0 kV の場合）及び構成材料から期待される A C、インパルス破壊電圧を求めると表 2.5 となる。

表 2.5 発生最大電界と破壊電圧期待値

項 目 ケーブル種類と構成	最大発生電界 (kV/mm)※	交流破壊電圧 (kV)	インパルス破壊 電圧 (kV)
A ケーブル (従来の段絶縁方式)	8 9	約 5 8 0	約 1 4 4 0
B ケーブル (均一絶縁方式)	8 9	約 5 3 0	約 1 3 8 0
C ケーブル (新段絶縁方式)	7 6	約 6 5 0	約 1 6 5 0

注 ※ インパルス 1 2 6 0 kV の場合

図 2.5、表 2.5 から設計手法による性能の差は明らかである。

- (i) A ケーブルの発生電界は 8 9 kV/mm に達するが、導体側に 7 0 μm 厚の絶縁紙を使用しているので予想破壊電圧は A C 5 8 0 kV、インパルス 1 4 4 0 kV となり、良好な耐電圧性能が得られよう。
- (ii) B ケーブルは完全な均一ケーブルで発生電界は A ケーブルと同じく 8 9 kV/mm であるが、予想破壊電圧は A ケーブルの 9 0 ～ 9 5 % に低下する。
- (iii) C ケーブルは、導体側に誘電率の高い絶縁紙を使用しているため、本来高電界となる導体側の電界は 7 6 kV/mm であり、これは A、B ケーブルの約 8 5 % に相当する。紙厚の差もあるが破壊予想電圧は A ケーブルよりも 1 2 ～ 1 4 % 向上する。

(2) ケーブルの誘電特性

(2.2)、(2.3) 式を用いてケーブル絶縁体の静電容量及び誘電正接を計算し

たものが表2.6である。

表2.6 ケーブル誘電特性の予測値 (80℃, 159 kV)

ケーブル種類と構成	静電容量 ($\mu\text{F}/\text{km}$)	誘電正接	$\epsilon' \tan \delta$
A ケーブル (従来の段絶縁方式)	0.360 ※ (3.9)	0.0028	1.09×10^{-3}
B ケーブル (均一絶縁方式)	0.314 ※ (3.4)	0.0020	6.8×10^{-3}
C ケーブル (新段絶縁方式)	0.317 ※ (3.4)	0.0019	6.5×10^{-3}

※ (.) 内は比誘電率

B ケーブルは、均一絶縁であるため、当然絶縁紙の特性がそのままケーブルの誘電特性となる。しかし、A ケーブルは従来紙を用い、薄紙による破壊性能の向上のみを目標としているため誘電特性は良好でなく、比誘電率 3.9、誘電正接 0.0028 であり 154 kV 級の誘電特性となっている。一方、C ケーブルは電界緩和のための高誘電率紙を導体側にのみ使用し、外周には誘電特性の優秀な絶縁紙を使用しているのでケーブルとしての誘電特性は良好である。

(3) 新段絶縁設計方式の効果

超高圧ケーブルの新段絶縁方式は、前節に示した絶縁材料の特性改良のみでは限界があると考え、限られた材料の最適な組み合わせでケーブルの絶縁性能の向上をはからんとするものである。

上述の表2.4～2.6及び図2.5に示したように、新段絶縁方法は予想通りの効果が期待されることが判明した。これをまとめると以下ようになる。

- (i) 導体上に薄紙を使用し、絶縁破壊強度を高めるという従来の方式に変え、導体側に誘電率の高い絶縁紙を使用し、発生する電界自体を緩和し、ケーブルの絶縁耐力を高めることが可能である。ここに示した例では、発生電界は約85%まで緩和され、予想破壊電圧は約14%向上する。
- (ii) 導体側に高誘電率の絶縁紙を使用し、外周側に低誘電率、低誘電体損の絶縁紙を使用することにより導体側の電界緩和に結びつくとともに絶縁体全体としての低損失化が果されている。また、誘電特性の良好な均一絶縁ケーブルとほぼ同等の低損失性となっている。

以上のように、新しい段絶縁方式を開発採用することにより低い誘電体損を維持したまま発生電界を緩和し、絶縁性能の高いケーブルを設計することが可能となる。

2.3 超高圧OFケーブルへの新材料，新段絶縁設計法の適用

2.3.1 目標性能

前述のように275、500 kV 系統として変圧器、遮断器、避雷器、架空送電線の開発が先行し、ケーブルに対する電圧面からの要求性能もこれらに対応した値となる。これらの値は先の表2.1にまとめられている。また、各送電々圧に対する誘電特性の要求値は表2.2にまとめた。これらを一括して275、500 kV ケーブルの要求性能としてまとめると表2.7となる。

表2.7 超高圧OFケーブルの要求性能

送電々圧(kV) 項 目	275	500	備 考
ケーブル 枠 耐 電 圧 (kV)	280	420	全枠10 min
試料 交 流 耐 電 圧 (kV)	420	630	試料6 h
試料交流破壊予測電圧 (kV)	500	850	耐電圧後 20kV/3h 昇圧
試料インパルス耐電圧 (kV)	1260	1860	負極性3回
試料インパルス予測破 壊電圧 (kV)	1500	2100	耐圧後 30kV/3回昇圧
絶縁体比誘電率 ϵ'	3.4	3.3	80℃, 運転対 地電圧
絶縁体誘電正接 $\tan \delta$	0.0025	0.0015	同 上
$\epsilon' \tan \delta$	8.5×10^{-3}	5.0×10^{-3}	同 上

一方、大容量送電を可能とするため導体サイズの標準を1200 mmとし、送電容量は275 kVで220～440 MVA/cct、500 kVで800～1500 MVA/cctを目標とした。無論、これらの容量を十分確保するには強制冷却方式の採用が必要となる。

強制冷却方式については第5章に詳述する。

2.3.2 超高圧OFケーブル用絶縁材料と段絶縁設計

ケーブルの超高圧、大サイズ化にともないケーブルの外径と重量が増加し、輸送と布設工事を考慮したとき、ある限界が生じる。

また、大量使用ケーブルとしての経済性も重要な事柄となる。表2.7の目標を満たすため、材料自体の改良と新たな段絶縁設計手法の開発を実施したが、これを実用ケーブルに適用し、その効果を実際に確認する必要がある。275 kV ケーブルと500 kV ケーブルは当然、用途、外径制限、必要性能面において差があり、その絶縁設計は異なる。しかし、その基本的な考え方である段絶縁設計手法の適用と、そのための材料の改良と選択という点では同一である。

(1) 絶縁材料の改良と選択

絶縁紙の改良に必要な要因（密度、気密度、厚み等）と特性に及ぼす効果については図2.4に示した。154 kV OFケーブル用の絶縁紙（A系統）を出発点として、脱イオン水洗の採用と高気密度化によりB系統絶縁紙を開発し、さらにC、D系統の絶縁紙を開発した。これら特性を一括して示したものが表2.8である。

275 kV 系統の絶縁設計に於ては、まず誘電特性の要求値が $\epsilon' \cdot \tan \delta < 85 \times 10^{-3}$ であること、外径寸法からとり得る絶縁厚が約19.5 mmとなること等の理由により従来紙の脱イオン水洗化と高気密度化により絶縁紙の改良をはかりB系統を開発した。

一方、500 kV 系統では、 $\epsilon' \cdot \tan \delta < 5.0 \times 10^{-3}$ が要求されることから、従来紙と同一パルプを使用することは不可能であり、このため脱イオン水洗を十分に実施するとともに、元来金属イオンの少い系統のパルプを使用し、低密度化と高気密度化をより一層押し進めた。その結果D系統の極低損失の開発に成功した。極低損失紙は誘電特性、絶縁耐力ともにすぐれたものであったが、機械強度が若干弱く、また、紙巻条件上必要な表面摩擦係数や、ヤング率が所定の値を満たさぬことが確認された。D系統絶縁紙を用いた先行試作によりケーブルの電氣的、機械的性能を調査した所、誘電特性以外は目標性能を満たさず、このためD系統絶縁紙の採用を断念した。D系統絶縁紙の特徴は極端に低密度化した点にあり、このため同一パルプを用いて、やや密度の高い絶縁紙を試作した。これがC系統である。誘電特性、絶縁耐力はD系統よりやや劣っているが、機械特性は向上し、所定の値が得られた。以上の経過から500 kV OFケーブルにはC系統絶縁紙を使用し、電気特性面は新段絶縁設計法で補うこととした。

表 2.8 O F ケーブル用絶縁紙の諸特性

絶 縁 紙 の 種 類		A 系 統 (従 来 紙)				B 系 統 (従来紙の改良)			
紙 厚 (μm)		45	70	125	150	100	125	125	150
密 度 (g/cm^3)		0.8	0.89	0.85	0.87	0.88	0.82	0.65	0.64
気 密 度 ($s/100cc$)		2,000	1,070	472	580	1,900	2,000	1,200	700
引張強さ	縦 ($kg/15mm$ 幅)	8.7	12.2	22.6	21.0	12.5	11.0	9.8	11.8
	横 ($kg/15mm$ 幅)	3.2	3.8	6.8	7.3	6.1	5.4	5.7	6.1
伸 び	縦 (%)	2.4	2.6	3.2	3.3	3.1	3.8	2.9	2.3
	横 (%)	6.9	9.0	11.3	11.2	8.5	8.5	7.0	6.0
誘電正接	常 温 (%)	0.255	0.260	0.268	0.232	0.250	0.200	0.194	0.175
	80℃ (%)	0.200	0.242	0.260	0.224	0.250	0.210	0.200	0.180
	100℃ (%)	0.250	0.250	0.265	0.230	0.272	0.224	0.215	0.205
比 誘 電 率		3.9	3.7	3.6	3.4	3.9	3.6	3.4	3.3
絶縁耐力	AC (kV/mm)	50	45.5	37.0	34.4	47.5	43.2	44.4	44.0
	インパルス (kV/mm)	159	133	105	101	137	132	126	116
絶 縁 紙 の 種 類		C 系 統 (新パルプの採用)				D 系 統 (極低損失化)			
紙 厚 (μm)		80	100	125	150	100	125	150	200
密 度 (g/cm^3)		0.9	0.85	0.69	0.69	0.70	0.60	0.58	0.59
気 密 度 ($s/100cc$)		5,000	5,000	1,300	1,200	1,330	3,371	933	315
引張強さ	縦 ($kg/15mm$ 幅)	8.5	10.0	10.0	11.5	9.8	9.0	9.2	11.3
	横 ($kg/15mm$ 幅)	4.0	4.5	5.0	6.0	3.4	3.8	5.1	6.2
伸 び	縦 (%)	3.5	4.0	3.0	2.5	4.5	3.4	4.1	1.8
	横 (%)	9.5	9.5	6.0	7.0	12.2	11.5	10.2	5.1
誘電正接	常 温 (%)	0.200	0.182	0.165	0.153	0.162	0.140	0.151	0.148
	80℃ (%)	0.177	0.167	0.151	0.142	0.145	0.130	0.134	0.138
	100℃ (%)	0.202	0.194	0.194	0.182	0.168	0.150	0.152	1.53
比 誘 電 率		3.7	3.6	3.3	3.2	3.3	3.0	3.0	3.1
絶縁耐力	AC (kV/mm)	39.5	38.0	37.0	34.0	51.6	52.3	50.5	44.0
	インパルス (kV/mm)	131	130	120	117	142	139	138	111

(2) 絶縁体の構成

275 kV OFケーブルの絶縁体構成は、前述の表2.4に示したケーブルCと同一であり、絶縁体内の電界分布は図2.5のとおり緩和されると考えられる。またケーブルの絶縁耐力及び誘電特性も表2.5, 2.6のとおりと予想される。

一方500 kV OFケーブルは、ケーブル輸送、工事上の制約から絶縁体外径の最大値として約120 mmφに抑えることが要請され、概算絶縁厚は約30 mmとなる。したがって、絶縁体内発生電界は高くなり、また、外径と重量増加にともなう機械的ストレスの増加、誘電特性の要求値 ($\epsilon' \cdot \tan \delta < 5 \times 10^{-3}$) 等厳しい制約が加えられ、絶縁設計には困難をともなった。しかし、表2.8に示したC系統絶縁紙を組み合わせることでより適切な設計を行なうことができる。

表2.8のC系統絶縁紙を用いた1200 mm OFケーブルの絶縁体内の電界分布を(21)式を用いて求めたものが図2.6である。図2.6中には均一絶縁の場合の電界分布及び使用材料の破壊強度を併記した。また(22)、(23)式を用いてケーブル絶縁体としての誘電率、等価比誘電率及び誘電正接を求めた。これらの結果から、当ケーブルで期待される特性をまとめると表2.9を得る。

2.3.3 超高圧OFケーブルの初期絶縁性能

開発したケーブルの諸性能については次節以降に詳述するが、ここでは前項の絶縁設計の効果を明確にするため、ケーブルの初期性能を示す。

表2.10は設計時点で期待された性能と試作ケーブルで得られた絶縁性能を比較したものである。

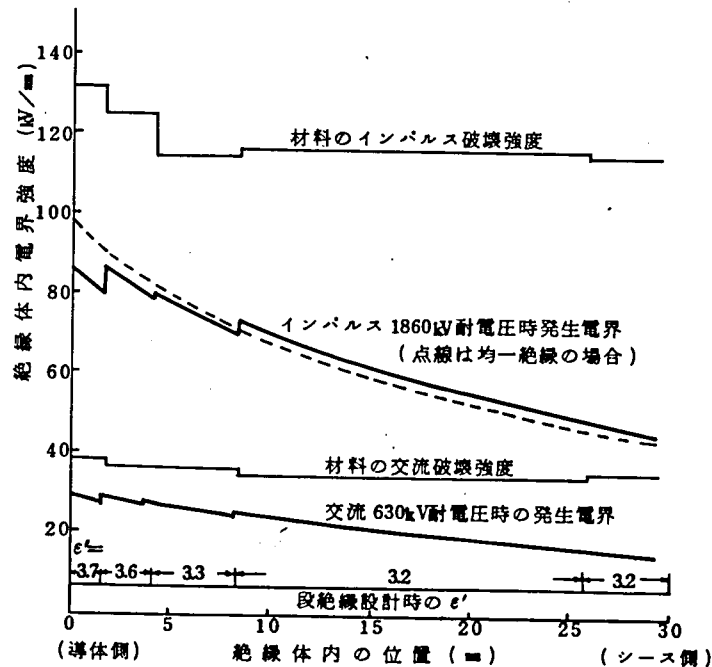


図2.6 500 kV 1×1200 mm OFケーブル絶縁体内の電界分布と使用材料の破壊強度

表 2.9 段絶縁設計によるケーブル性能向上効果

項目 絶縁構成	最大発生 電界 (kV/mm) ※	期 待 破 壊 電 圧		予 想 誘 電 特 性	
		AC (kV)	インパルス (kV)	ϵ'	$\tan \delta$
均一絶縁	9.7	680	2000	3.7	0.0018
段絶縁	8.6	840	2260	3.3	0.0016
効 果	11% 低減	11% 向上	11% 向上	10% 低減	12% 低減

注) ※ インパルス耐電圧 1860 kV の場合

表 2.10 超高圧 OF ケーブルの期待性能と初期性能

項 目 ケーブル 性 能	275 kV OF ケーブル		500 kV OF ケーブル	
	期待性能	初期性能	期待性能	初期性能
交流破壊電圧 (kV)	650	660	840	850
インパルス破壊電圧 (kV)	1650	1640	2260	2190
比誘電率 ϵ'	3.4	3.3	3.3	3.3
誘電正接 $\tan \delta$	0.0019	0.0017	0.0015	0.0014
$\epsilon' \cdot \tan \delta$	6.5×10^{-3}	5.6×10^{-3}	5.0×10^{-3}	4.6×10^{-3}

上表で期待性能と初期性能を比較するとほぼ一致しており、全般に初期性能が期待性能を上まわっている。ただし、500 kV OF ケーブルのインパルス破壊電圧に於て、約 3% 初期値が低くなっているが、これは材料特性及びケーブル特性測定上の誤差範囲である。

表 2.7 の目標性能に対し、従来の材料及び設計手法を適用すれば実現不可能な超高圧 275、500 kV OF ケーブルが、絶縁材料の改良と新たな段絶縁設計手法の導入により実現可能となった。

以下に各ケーブルの構造、性能等を詳述する。

2.4 275 kV OF ケーブルによる実証研究

前述の材料面の検討及び設計手法の開発結果の実際の効果を確認するため275 kV OF ケーブルを用いた実証的研究を行なう。

すなわち、275 kV OF ケーブルの本格的な実用化の前に、2.2 節に述べたような多くの新しい提案を盛り込んだ新しい275 kV OF ケーブルを試作し、これを実線路を模擬した状態で布設し、さらに数年にわたって苛酷な温度並びに電圧条件のもとで運転した。このとき、初期、並びに最終の性能確認試験を実施するとともに実規模試験中の種々の特性を測定し、当該ケーブルが実線路に於て使用されても全く問題のないことを検証しておく必要がある。

2.4.1 ケーブルの構造と特徴

試験に供したケーブルは、275 kV アルミシースOF ケーブルであり、その構造は図2.7の写真に示され、詳細寸法は付録Iに示したとおりである。

各部構造等は以下に示す特徴を持っている。

〈導 体〉 大サイズ導体の表皮効果による導体交流抵抗の増大を防止するため、6分割導体となっている。

〈絶縁体〉 前節に述べたように、低損失化と高絶縁耐力を得るため、100～150 μm の脱イオン水洗紙を使用し、段絶縁設計を採った。なお絶縁油としては長期安定性の秀れている点を確認し⁶⁾、アルキルベンゼン合成油を使用している。

〈金属シース〉 波付アルミシースを採用し、ケーブルの機械的特性の向上をはかっている。

2.4.2 初期電気性能

長期試験中の劣化を考察する基準としてケーブルの初期電気性能を求めた。その結果は表2.1.1のとおりである。

表 2.1.1 275 kV 1×1200 mm² アルミシース OF ケーブルの
初期電気性能試験結果

試 験 項 目			試 験 結 果		備 考
導 体	直 流 抵 抗 (Ω / km)		0.0150		20℃
	交流実効抵抗 (Ω / km)		0.0162		20℃(表皮効果0.08)
静 電 容 量 ($\mu F / km$)			0.312		20℃
わ く 耐 電 圧 試 験			280 kV 10分良		室 温
試 料 交 流 耐 電 圧 試 験			420 kV 6時間良		室 温
交 流 破 壊 試 験			660 kV 35 min破壊		420 kV 耐電圧後 20 kV 3 h 昇圧
試料インパルス耐電圧試験			1260 kV 3回良		室 温
常温インパルス破壊試験			1640 kV 3回目破壊		20 kV 3回昇圧
高温インパルス破壊試験			1600 kV 1回目破壊		80℃20kV 3回昇圧
誘電正接 (%)	測定電圧 (kV)		159	318	ケーブル外部からの 均一加熱
	測定温度 (℃)	25	0.167	0.195	
		40	0.157	0.188	
		60	0.156	0.187	
		70	0.161	0.190	
		80	0.174	0.201	
		90	0.192	0.218	
交流破壊強度 (kV/mm)			46.2		—
インパルス破壊強度(kV/mm)			115		—

交流とインパルスに対する破壊電圧はいずれも耐電圧値を大きく上まわっており、破壊時の最大電界強度は、各々46.2 115 kV/mmである。

ただし、これらの値は、19.5 mm厚の絶縁体を有するケーブルの性能を評価するため均一絶縁として算出したものである。実際に採用した段絶縁設計と遮蔽層の厚さを考慮すると破壊時の最大電界強度は、交流に対し42 kV/mm、インパルスに対し109 kV/mmとなり、採用した油浸紙の材料の値の各々約90,80%に相当している。この低下は絶縁体の厚み効果及び曲げ等の機械的ストレスによるものである。一方ケーブルの誘電特性の温度依存性が図2.8に示されており段絶設計を考慮した計算値も記入されている。

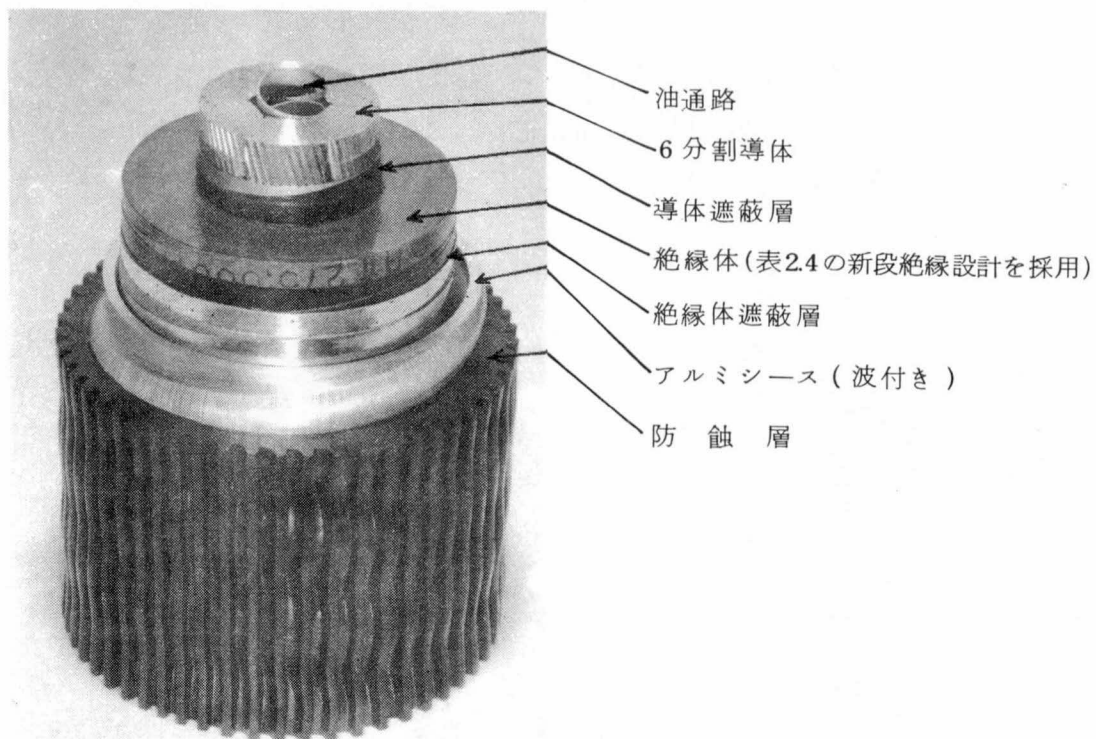


図 2.7 275 kV 1 × 1200 mm² アルミ被 OF ケーブル

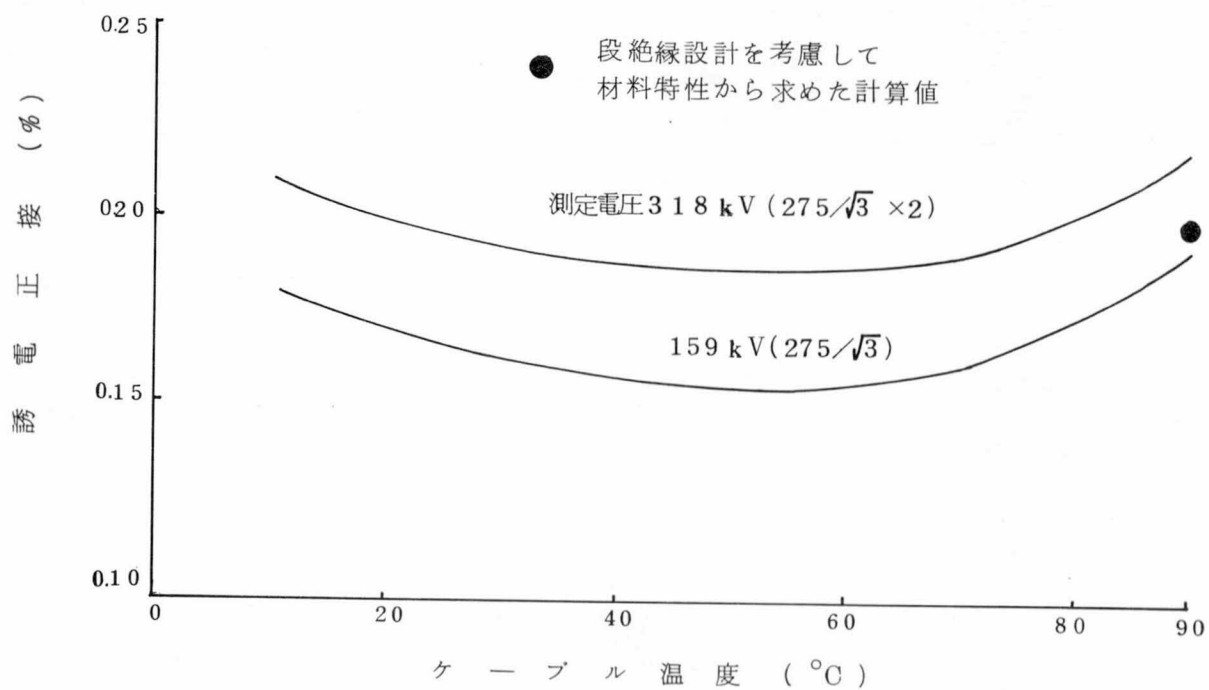


図 2.8 275 kV OF ケーブルの誘電正接測定結果

表 2.1.1 中のケーブル静電容量、及び図 2.8 の誘電正接には期待通りの段絶縁効果が発揮され、低損失化が果されている。なお、これは表 2.6 の例と若干異なっているがそれは、実際に採用した絶縁紙構成が表 2.6 の場合の構成（表 2.4）と細部に於て多少変更されていること及び材料検討時に比して絶縁体のボリュームが大きく相対的に汚損の影響が軽減されること、の二つの理由によっている。

以上の如く、超高压ケーブルとしての低損失化と絶縁耐力の向上は、新たな材料と絶縁設計により解決することができた。

2.4.3 長期課電通電試験

実線路を完全に模擬した全長約 200 m の線路を建設し、ここに 275 kV OF ケーブルを布設して長期間の課電通電試験を実施した⁸⁾。

超高压 OF ケーブルの耐用年数として、一般に 30～40 年が要求されており、この間の性能変化を 1～2 年の試験結果から推定し、実用化が可能か否かの判定をしなければならない。このため上述の如く、極力実線路に近い状態で長尺ケーブルを布設し、これに実使用時よりも高い電圧と大きい電流を加え、電氣的、熱的、及び機械的劣化を促進させ、早く結論を見出す方法がとられている。諸外国に於ても 230～345 kV 級ケーブルに対し、このような試験方法が採用されており、超高压ケーブルの開発と実用化に大きい成果をもたらしている。^{7)～11)}

我国に於ても 275 kV OF ケーブルの開発に当り、初めて本格的な長期課電通電試験を採用した。その試験回路の概略を図 2.9 に示す。

試験は昭和 42 年から約 2 年間継続され、この間の印加電圧と通電々流及びケーブルの最高温度、温度変化幅は図 2.10 に示したとおりである。

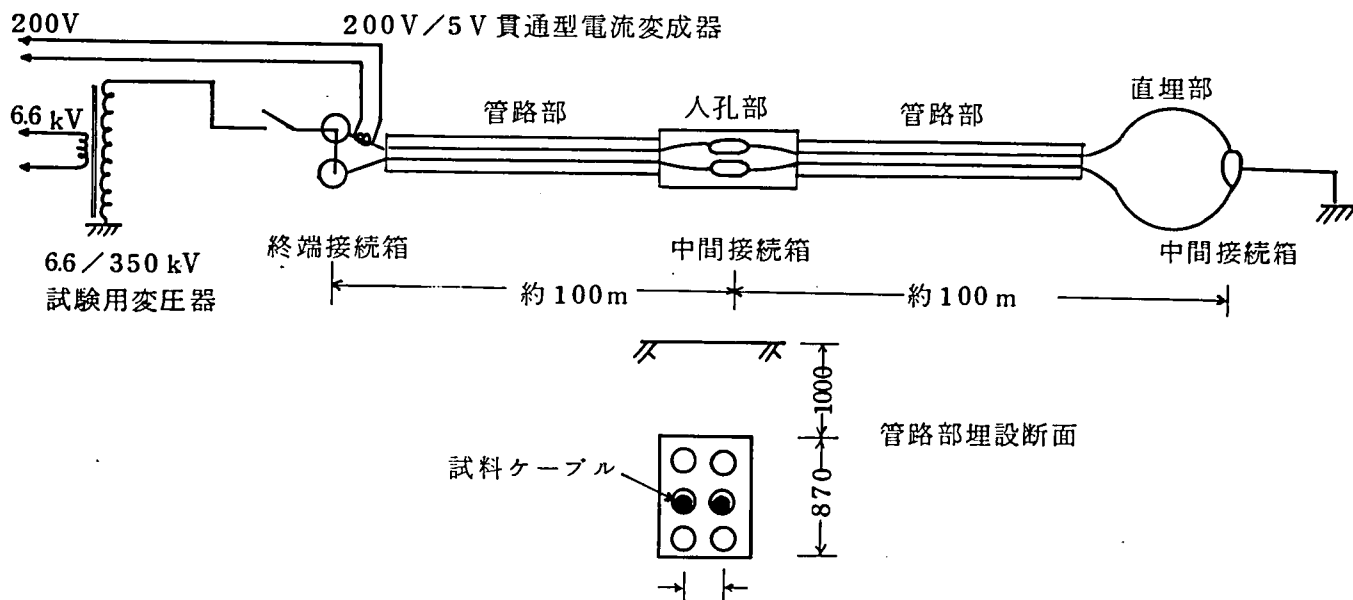


図 2.9 長期課電通電試験回路

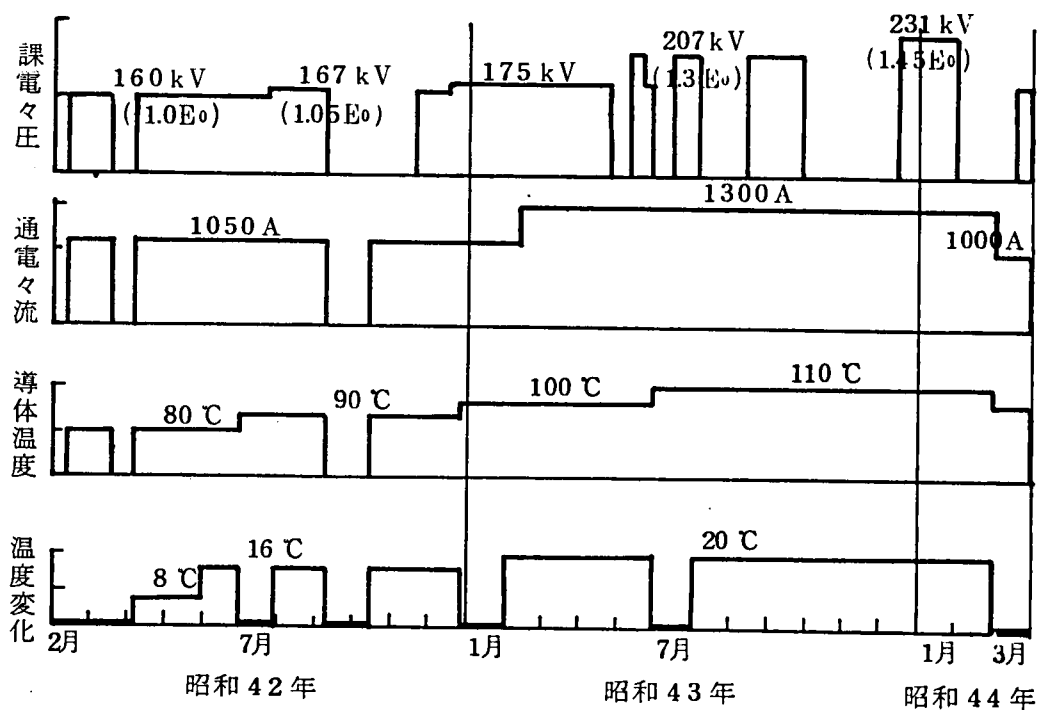


図 2.10 アルミ被OFケーブル試験線の運転経過の概要

このような条件下で長期試験を実施し、条件の変る毎にケーブルの誘電正接を測定して、試験進行にともなうケーブルの劣化状況を判定した。その経過を誘電正接の温度依存性でまとめたものが図 2.11 である。

長尺線路の長さ方向の温度分布が測定時点によって多少異なるため、誘電正接値も測定時点で変動する点を考慮しなければならないが、全期間を通して誘電正接値はほとんど変化しておらず、むしろ試験の進行とともにわずかに減少する傾向にある。なお図 2.11(a), (b)に於ける遮蔽層構造については後述する。

誘電正接値の減少の傾向は、図 2.12 に示した誘電正接の電圧依存特性によってより明確となる。すなわち、初期においては、誘電正接の値自体は無論、測定電圧に依存した増加の割合も大きいのに対し、最終的には、値自体とともに電圧依存性も小さくなっている。

なお、誘電正接の電圧依存性が、初期状態においてかなり大きくなるのは、内部放電によるものではなく半導電遮蔽層の構造によっていることが明らかにされた。すなわち、200mの線路の一部に誘電正接のより一層の減少を目標として特殊遮蔽層構造を採用したが、そのケーブルの誘電正接は図 2.11、2.12 の(b)に示したように、初期から最終状態まで電圧への依存性が極めて小さくなっている。

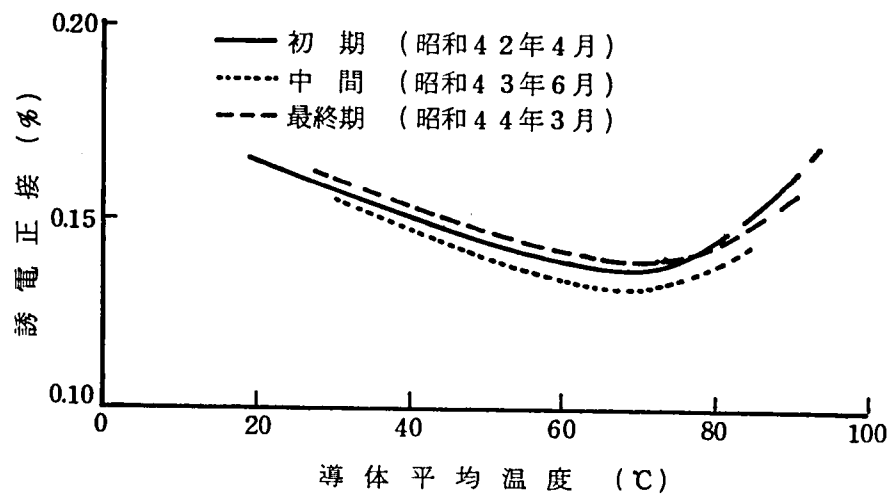
一般に OF ケーブルの半導電遮蔽層としてカーボンブラック紙を使用しており、これが、絶縁紙及び油隙層と直接々触しているが、特殊構造においては、カーボンブラック紙の表面処理により微細繊維の直接々触を防止している。通常のカーボンブラック紙では、ごくわずかの不純物が油中に溶出し、これが初期誘電正接の電圧依存性を大きくするが、交流課電状態で次第に絶縁紙に吸着され固定されるため誘電正接に寄与しなくなるものと考えられる。一方、カーボンブラック紙の表面をあらかじめ処理することにより、初期から不純物の遊離がないので、電圧依存性が見られなくなる。

実使用条件下に於ては、誘電正接は低い値に安定化する傾向にあるので、半導電遮蔽層構造はいずれも可とすることができる。

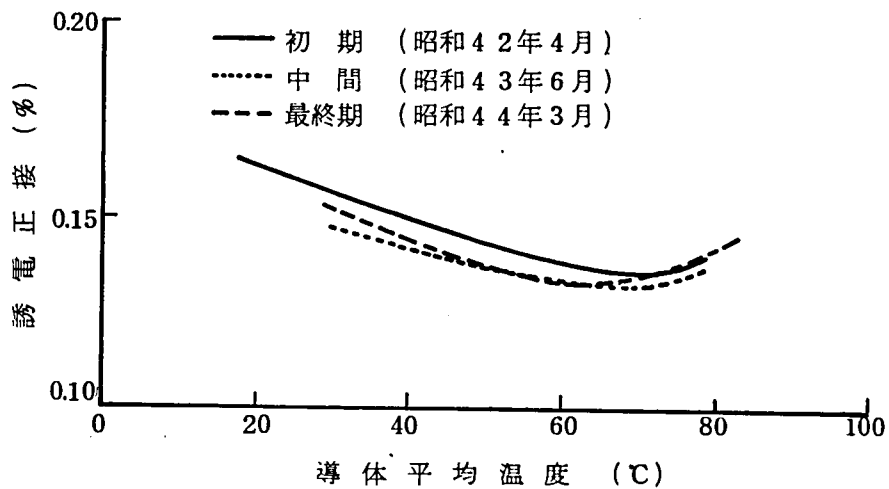
試験線路にはケーブル以外に実系統で必要となる終端箱、中間接続箱等が含まれており、これらの誘電正接値も測定し、ケーブルと同様に安定していることを確認した。

長期試験中に電気的特性として得られたデータは誘電正接のみである。一方、機械特性としては、温度上昇、温度変化に伴なうケーブルの伸縮量と金属シースの歪を実測し、ケーブルに加えられる機械的ストレスの面からも検討を加えた。¹²⁾

全試験期間中に加えられた各種ストレスを前節に述べた劣化則、或いは機械的な疲労則にあてはめ、実線路条件での運転期間に計算すると、かなり安全側に見ても約 15 年に相当する。

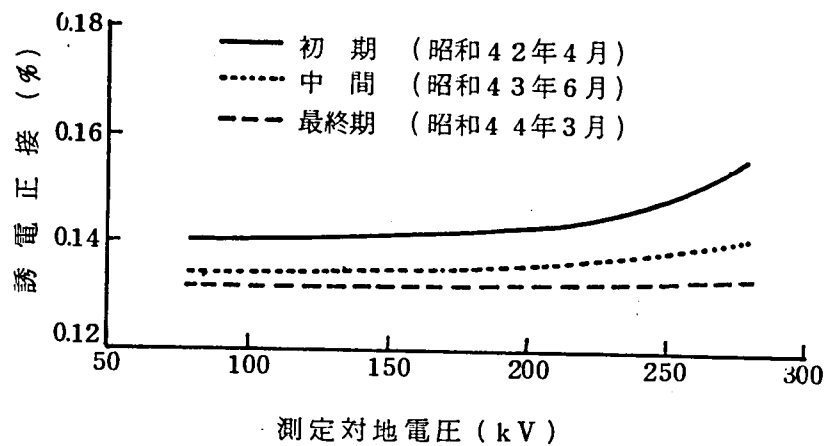


(a) 普通遮蔽構造のケーブル

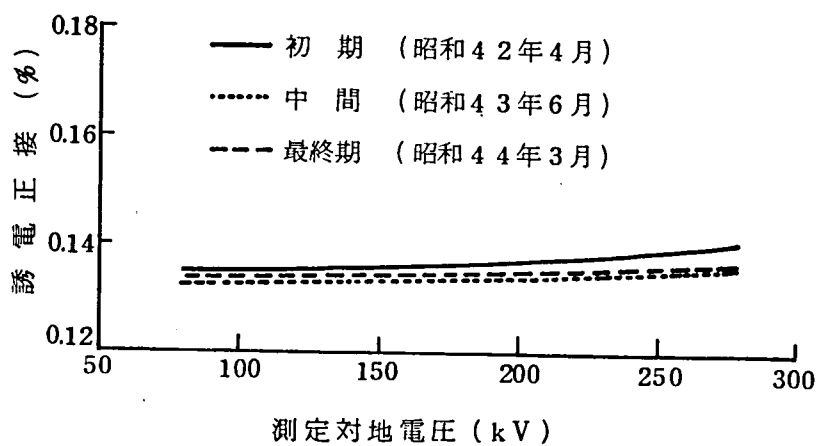


(b) 特殊遮蔽構造のケーブル

図 2.1.1 275 kV アルミシースOFケーブルの誘電正接の温度依存性



(a) 普通遮蔽構造のケーブル



(b) 特殊遮蔽構造のケーブル

図 2.1.2 275 kVアルミシースOFケーブルの誘電正接の電圧依存性

なお、図 210 の試験実績でとくに注目されるのは、試験期間の最終 2 ヶ月に運転電圧の 1.45 倍の過電圧を加えた点である。このとき、ケーブル絶縁体には約 17 kV/mm の交流電界が加わるが、このような高電界によってもケーブルの劣化の徴候が見られず、500 kV ケーブルでこれに近い設計電界を採り得る見通しが得られた。

以上の如く、長期試験により、本ケーブルは 15 年以上の寿命を有することが推定されたが、さらに次節の最終性能確認試験により、残された寿命がどの程度かを検討した。

2.4.4 最終性能確認試験と絶縁性能の考察

長期課通電試験終了後のケーブルと接続部を慎重に撤去し、工場へ持ち帰り、最終性能を確認した。この試験はサンプルの電氣的破壊試験と各部の解体調査並びに構成材料の特性確認からなっている。

ケーブルの電氣的破壊試験結果を初期値と比較して表 212 に示した。試験用の終端箱で絶縁破壊を生じたものもあるが、いずれの値も初期値を上まわっている。

また、図 2.13 はケーブルの誘電正接特性を、長期試験前と撤去後に同一条件で精密に測定したものであり、図 2.11、2.12 の長期試験中の推移と一致して長期課電通電により、かえって低い値となっている。

表 2.12 ケーブル破壊性能の初期値と最終値の比較

試料 項 目	初 期 値 (長期試験前)	最 終 値 (長期試験後)
交 流 破 壊 電 圧	660 kV 35 min	680 kV 以上 (終端部外閃)
インパルス破壊電圧	1640 kV 3 回	1720 kV 2 回
開閉インパルス破壊電圧	1620 kV 2 回	1720 kV 以上 (終端部外閃)

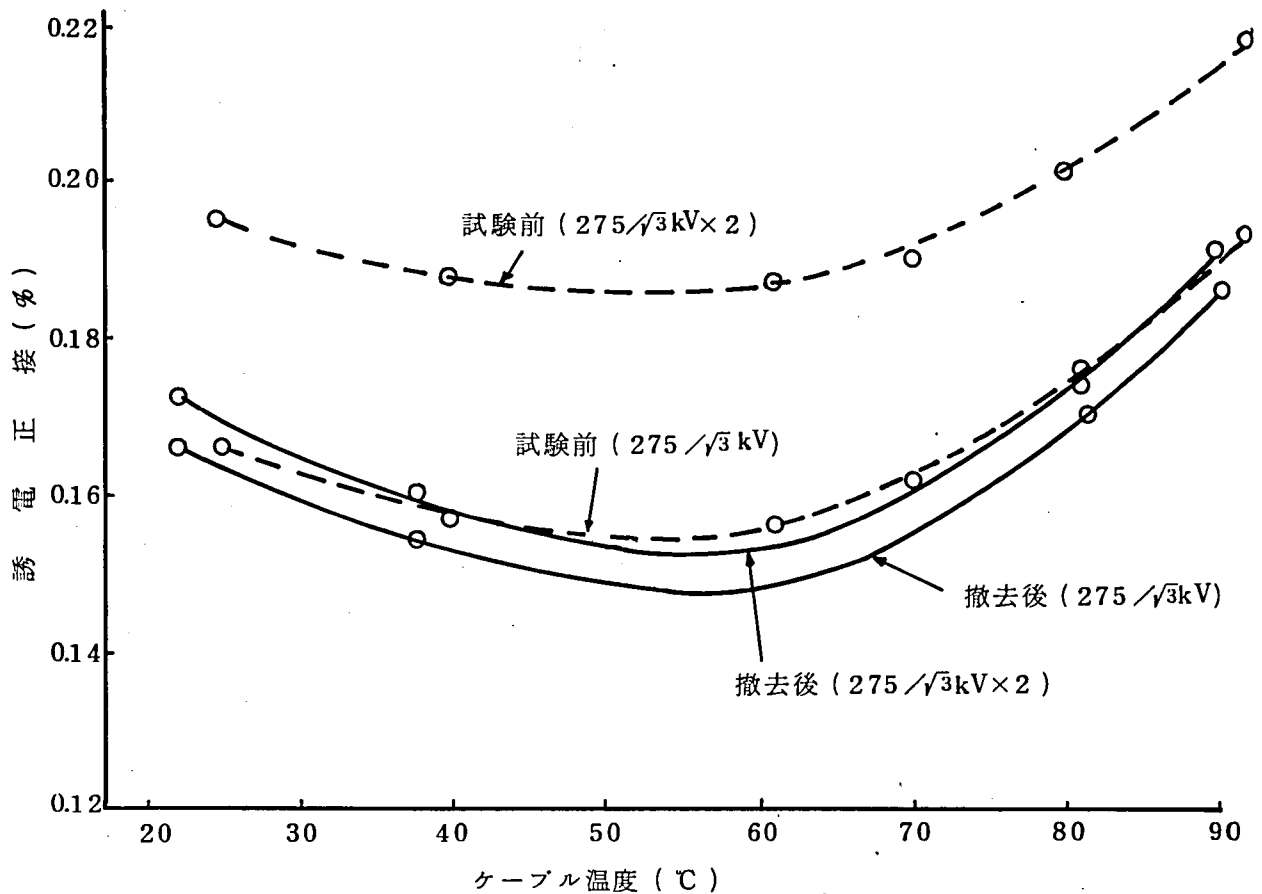


図 2.1.3 ケーブル誘電正接の温度特性

一方、各部の構造について詳細に目視観察し、すべて異常のないことを確認するとともに、構成材料については劣化状況を把握するため種々の特性を測定し以下の結果を得た。

(1) 絶縁油の諸特性

ケーブル、終端接続箱、中間接続箱から採取した絶縁油と新品の絶縁油の諸特性を比較して表 2.1.3 に示した。破壊電圧、誘電正接、比誘電率等の電気特性の面で終端接続箱と中間接続箱からの絶縁油は極くわずかに特性の低下が見られるが、これは組立時の微量の汚れが残留するためである。絶縁油の劣化を顕著に示す指数は、粘度、全酸化、銅板腐蝕性等の物理、化学的特性であり、これら特性においては、いずれの絶縁油においても劣化の徴候を示す値を示していない。したがって絶縁油の諸特性からはケーブル、接続箱ともに安定した特性が維持されていると云える。

表 2.1 3 絶 縁 油 の 諸 特 性

項 目 \ 採取場所	ケ ー ブ ル	終 端 接 続 箱	中 間 接 続 箱	新 油
破 壊 電 圧 (kV/15mm)[27.5℃]	5 9.5	5 8.1	5 8.2	5 9.0
$\tan \delta$ (%) [80℃]	0.0 0 7 0	0.0 0 7 4	0.0 0 9 1	0.0 0 5 ~ 0.0 0 9
$\rho (\times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm})$ [80℃]	3.0	4.4	3.1	5 ~ 1.0
ϵ' [80℃]	2.2	2.1 7	2.2 8	2.2
水 分 量 (ppm)	1 2.0	1 1.6	1 0.4	8 ~ 1 2
比 重 (g/cc)[20/4℃]	0.8 6 6	0.8 6 5	0.8 6 5	0.8 6 5
膨 張 率 ($\times 10^4$)	8.3	8.3	8.3	8.3
引 火 点 (℃)	1 3 0	1 3 2	1 3 2	130 ~ 134
流 動 点 (℃)	-5 0 以下	-5 0 以下	-5 0 以下	-5 0 以下
粘 度 (CS)	[30℃]	1 1.8	1 1.7	1 1.6
	[75℃]	3.2 0	3.2 1	3.2
蒸 発 量 (%) [98℃×5h]	0.2	0.1 7	0.1 7	0.1 7
全 酸 化 (mgKOH/g)	0.0 0 4	0.0 0 2	0.0 0 4	0.0 0 2
銅 板 腐 蝕 性 [100℃×3h]	1 a	1 a	1 a	1 a
色 相	-1	-1	-1	-1

(2) 油浸紙の誘電特性

ケーブル絶縁体全体の誘電正接特性は図 2.1 3 に示したとおりである。これをさらに詳細に検討するため、絶縁体を構成する約 150 枚の油浸紙を外側から一枚ずつ取り出し誘電正接を測定した。これは一般に半径方向の誘電正接という意味で、radial power factor (r. p. f) と云われている。測定電極や測定条件をある一定条件とするため、絶対値はケーブルでの値と異なるが、半径方向の相対的分布を知ることにより、仮りに劣化があればその半径方向の位置が明確となり、その原因や対策の考察が容易となる。

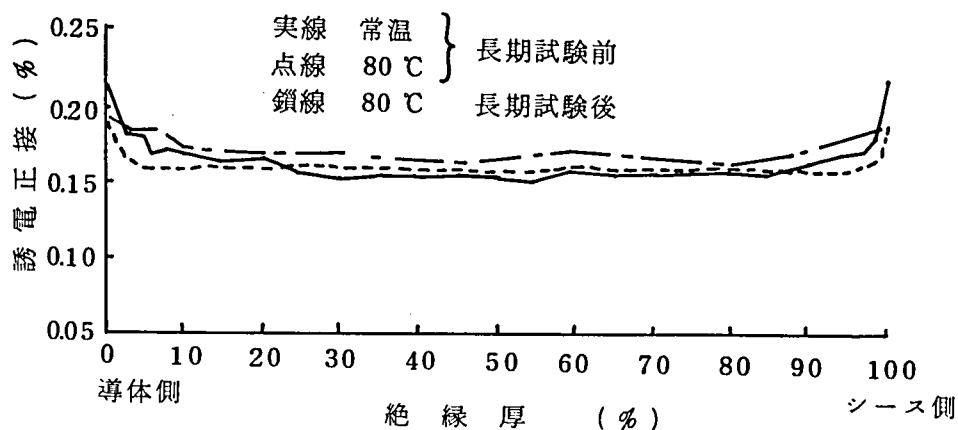


図 2.14 ケーブル絶縁体内の油浸紙の誘電正接
(半径方向での変化 r. p. f.)

結果は図 2.14 のとおりである。導体側とシース側において、やや高い値を示しているが、これはケーブル製造時の絶縁油含浸が導体油通路側とシース波付構造側から行なわれるため含浸される油に対し、カーボンブラック紙及び数層の絶縁紙は一種のフィルタとなり、この部分に微量の汚れが吸着されることによっている。また、絶縁厚の相対位置 5 % ~ 20 % 程度のところで誘電正接がやや高くなっているが、これは前述の段絶縁設計によるものである。

全体として長期試験前と比較して特異な分布は示しておらず、劣化の様子は観察されない。

(3) 油浸紙並に絶縁紙の諸特性

絶縁紙の劣化の傾向を顕著に示す物理、化学特性として、油浸紙の水分量、並に絶縁紙の平均重合度、引張り強さ、伸びを測定し、表 2.14 の値を得た。

表 2.14 油浸紙並に絶縁紙の特性変化

項 目		試料採取位置				
		半 径 方 向 位 置				
		最内層	中間層(1)	中間層(2)	中間層(3)	最外層
水 分 量 (重量%)		0.11	0.08	0.08	0.09	0.10
平均重合度	絶 対 値	950	970	985	1000	1015
	初期値に対する比率(%)	90.0	92.4	93.7	95.2	96.5
引張り強さ (15mm巾)	絶 対 値 (kg)	9.6	9.1	9.4	9.5	10.6
	初期値に対する比率(%)	87.2	97.0	95.8	95.5	98.2
伸 び (%)	絶 対 値 (%)	2.8	2.9	3.0	2.8	3.0
	初期値に対する比率(%)	102	101	98	98	100

上述までの諸特性に於ては全く劣化の徴候が見られなかったが、平均重合度と引張強さに於て、はじめて加熱劣化を示す値が得られている。段絶縁構成をとっているため、各特性の絶対値を比較することができない。このため、長期試験前の特性に対する比率も併記した。この比率を見ると平均重合度と引張り強さは最内層での低下が大きい。即ち、負荷電流により、導体側は $80\sim 110^{\circ}\text{C}$ となったのに対し、最外層側は $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 低い温度で試験されたため熱劣化の度合が異なってきたと判断される。

2.4.5 絶縁性能と劣化に関する考察

上述の如く、試作した275 kVアルミ被OFケーブルは、所期の絶縁性能を発揮し長期試験を通して安定した性能を維持することが確認された。これを劣化及び寿命という点から詳細に検討した。

(1) 長期試験中の劣化量の換算

長期試験中に加えられた電氣的、熱的ストレスによる積算劣化量を実線路に於けるストレスと時間に換算すると以下のようにになる。ただし、その換算には2.1.2に記した n 乗則 ($n=9$)” 及び $\theta^{\circ}\text{C}$ 半減則 ($\theta=7^{\circ}\text{C}$)” を用いた。

電気ストレスによる劣化：[$\Sigma v^9 t$, (v :kV, t :月数)]

$$\begin{aligned} &= (1.0 E_0)^9 \times 4 + (1.05 E_0)^9 \times 3 + (1.1 E_0)^9 \times 5 \\ &+ (1.3 E_0)^9 \times 4 + (1.45 E_0)^9 \times 2 \\ &= 119.5 (E_0)^9 \end{aligned}$$

実線路での等価期間 $t_1 = 119.5 E_0^9 / (1.0 E_0)^9 \div 120 \text{ヶ月} = 10 \text{年}$

同様にして熱的ストレスによる劣化の等価期間 t_2 は

$$t_2 \div 15 \text{年}$$

温度変化に伴うケーブル熱伸縮による機械ストレスの等価期間 t_3 は

$$t_3 \div 15 \text{年}$$

これら種々の劣化による相乗効果については、まだ十分明らかにされておらず、今回の長期試験が厳密に実線路換算で何年に相当するかを決定することはできない。しかし通常の機械ストレスはケーブルの金属シースの疲労に影響するが、絶縁体に直接影響することはないので別個に考えることができる。

したがって、絶縁性能の劣化という観点からすれば t_1 または t_2 が等価期間であるとすることができる。

(2) 絶縁耐力の低下

表2.12で長期試験前後のケーブルの絶縁破壊電圧を比較すると、わずかではあるが、明らかに長期試験後の破壊電圧の方が高くなっている。モデルケーブル等の材料での検討では、20 kV/mm以下の交流ストレスを長期間加えることにより、破壊強度はかえって上昇し、いわゆる熟成効果の生ずることが報告されている。¹³⁾ 今回の

275 kV O F ケーブルの試験により実際のケーブルにおいても同様の熟成効果が確認された。したがって、12～17 kV/mm 程度の交流ストレス下では、絶縁耐力の低下は生じないと云える。

(3) 誘電特性の劣化

実線路換算で、10年～15年に相当する試験でケーブルの誘電正接はかえって低下している。その原因の大部分は初期に半導電層付近に遊離していた不純物が次第に絶縁紙に吸着されることによっていることが明らかになった。これも一種の熟成効果である。

一方、半導電層の影響が生じぬよう作製されたモデルケーブルの長期劣化試験結果から、20 kV/mm 以下の交流ストレスのもとで誘電正接は安定して一定の値を保つことが把握されているので今回の結果と合わせると、誘電特性の面からも問題となる劣化は生じないと判定される。

(4) 絶縁紙の物理特性の低下

長期試験後の最終性能試験に於て、特性の劣化が認められたものは絶縁紙の平均重合度と引張り強さである。この劣化量が実線路に換算して約15年に相当し、同じ速度で劣化が進行するものとする、40年後には平均重合度が800以上、引張り強さは8 kg/15 mm にまで低下することになる。しかし、これらの値はケーブル用絶縁紙として要求される値(4～5 kg/15 mm)を十分充している。

(5) 金属シースの疲労

金属シースの機械的ストレスによる劣化、疲労は、鉛やアルミシースに関してすでに明らかにされており、今回の試験ではそれを再確認するにとどまった。実線路においては、想定される熱伸縮、或いは熱応力によって繰り返し発生する歪量が一ヶ所に集中することのないよう適宜曲り部(オフセットと呼称)を配置しており、長期試験中に実測されたデータから、従来の考え方が超高圧大サイズについても成り立つことが確認できた。⁽¹²⁾

したがって、30～40年間に金属シースが疲労し、クラックや破断が生じることがないよう、鉛被ケーブルにおいては歪量を0.1%以下に、またアルミ被ケーブルでは、0.3%以下に保つ必要がある。

2.5 500 kV OF ケーブルの絶縁性能

電力需要の増大と大容量発電所の遠隔化は、500 kV 級長距離送電線、並びに外輪線の建設を一層早め、昭和40年代末には500 kV 送電が開始された。500 kV 系統では臨海直接昇圧方式が採用され、500 kV トランスから架空送電線への引出し部に使用する500 kV ケーブルの早期開発が必要となった。この際、単に電圧のみでなく、発電機の単機容量の増加にともなって1ルート当り3000 MVA (1回線当り1500 MVA) 以上の送電容量を持つことも要請された。

275 kV 級ケーブルの開発段階には、すでに世界各国で250～345 kV 級ケーブルが使用され、多くの情報がもたらされた。しかし、500 kV 大容量ケーブルに関しては、世界的にも例がなく我国独自の技術で開発する必要があった。筆者は、275 kV OF ケーブルの開発とその実績をもとにこの開発を実施したものである。

2.5.1 500 kV OF ケーブルの設計

(1) 絶縁厚みの検討

運転時の交流電界強度、インパルス耐電圧性能、その他諸試験に耐え得る絶縁厚として導体1200 mm²の場合には30.0 mm、2000 mm²の場合には29.5 mmを採った。その材料と組み合わせ構造についてはすでに2.2節に詳述したのでここでは簡単に1200 mm²の場合を例として結果をまとめる。

(i) 交流電界強度

ケーブルモデル及び275 kV OF ケーブルによる長期試験により、20 kV/mm においても明確な劣化の徴候が見られないこと、¹³⁾高温下においても17 kV/mm の電界で安定した性能を維持すること(2.4節)が実証されており、15 kV/mm の運転電界が許容できるとの見通しが得られる。先の図2.2の絶縁厚と発生電界強度の関係から、これに相当する絶縁厚は29 mm～30 mmとなる。

(ii) インパルス電界強度

同じく、図2.2から、インパルス耐電圧値に対する電界を100 kV/mm に抑え、絶縁厚は約29 mmとなる。

以上の数値29～30 mmと後述の絶縁紙構成の検討から最終的に、500 kV 1×1,200 mm² OF ケーブルの絶縁厚を30 mm (内外の半導電層を除く実質絶縁厚は29.4 mm) と設計した。同様の検討から2000 mm²に対しては29.5 mm (実質絶縁厚28.9 mm) の絶縁厚となる。

以上の基本的な絶縁厚にもとづき絶縁材料の改良を施し、新段絶縁設計を採用した点については前述の通りである。

(2) 導体構造その他

大サイズ導体の表皮効果を押えるため、従来と同じく6分割圧縮成形導体構造をとった。ケーブルに大電流が流れること、ケーブル全体の油量が多くなっていること等の理由で、導体中央の油通路標準径を18mmに選択した。アルミシースや防蝕層については、275kV OFケーブルの経験をそのまま活用して、各々の厚さを決定した。なお、2000mm² OFケーブルについては、鉛被を施している。

- (3) 上記の各部構造をもとに、表2.15に示す2種のケーブルを設計した。また図2.15は1200mm²と2000mm²の500kV OFケーブルを示し、図2.16は275kV 1200mm² OFと500kV 1200mm² OFケーブルを比較したものである。

表2.15 500kV 1×1200mm² OFAZV
ならびに1×2000mm² OFZVの構造

項 目		単 位	数 量	
ケ ー ブ ル 種 類		—	1×1200mm ² アルミ被OF	1×2000mm ² 鉛被OF
油 通 路	内 径	mm	18.0 (±0.5)	18.0 (±0.5)
	厚 さ	mm	0.8	0.8
	外 径	φ mm	19.6	19.6
導 体	公 称 断 面 積	mm ²	1200	2000
	形 状	—	6分割圧縮	6分割圧縮
	構 成	—	61本×6セグメント	109本×6セグメント
	計 算 断 面 積	mm ²	1200	2000
	セグメント絶縁厚さ	mm	0.125	0.125
	バ イ ン ダ 厚 さ	mm×枚	0.15×1,0.10×1	0.15×1,0.10×1
	外 径	mm	47.9	59.4
絶 縁 体	導体上カーボン紙	mm	0.3	0.3
	絶 縁 厚 さ	mm	29.4	28.9
	絶縁体上カーボン紙	mm	0.3	0.3
しゃへい層厚さ		mm	0.3	0.3
バ イ ン ダ 厚 さ		mm	0.5	0.5
金 属 シ ー ス 厚 さ		mm	2.8 (アルミ被)	4.5 (鉛被)
座床, 補強層厚さ		mm	—	1.3
ビニル防食層厚さ		mm	4.5	4.5
概 算 外 径		φ mm	142	145
概 算 重 量		kg/km	3000	5600

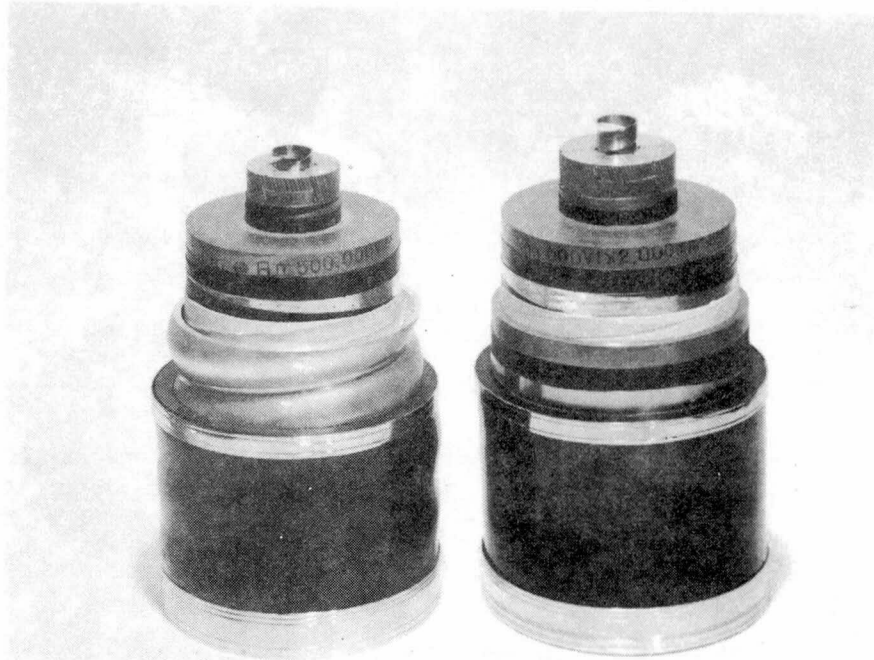


図2.15 試作500 kVOFケーブルの構造
(左:1200 m^2 ,右:2000 m^2)

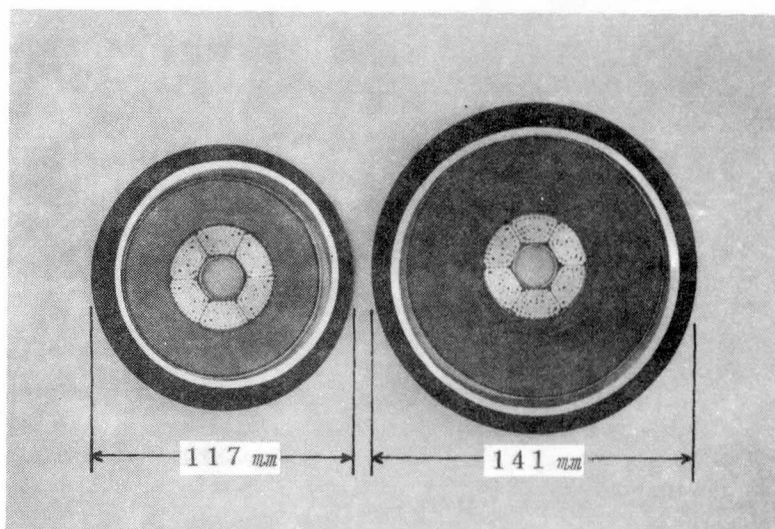


図2.16 275 kVOFケーブルと500 kVOF
ケーブルの比較

(4) 絶縁体の構成

すでに述べたように、超高圧ケーブルの絶縁体には、低誘電体損、高絶縁耐力、及び高機械的強度が要求される。

この要求に応えるため、275 kV OFケーブルにおいて絶縁紙の種々の改良と段絶縁設計方式によるストレスの緩和をはかり、総合性能の点から最適な絶縁体構成を得ることに成功した。500 kV OFケーブルにおいてもこの成果が全面的に活かされている。

(i) 絶縁体材料

油浸紙材料の低損失化を主眼として、いくつかの絶縁紙を試作し、その特性を検討した。最終的には比誘電率 3.0、誘電正接 0.12% のものが得られたが、低損失化を果すため他の特性、とくに機械的特性が犠牲となった。この絶縁紙を用いた先行試作により機械的強度不足のため、紙のしわや切れが生ずる可能性が大きいことが認識された、これを防ぐには紙巻工程時の張力を低くして巻かねばならず、絶縁耐力が低下することが確認された。このため、低損失化には限度があると判断し、誘電体損、絶縁耐力、機械的強度等の特性を具体的に指示し新たな絶縁紙を開発した。

これらの研究の結果、得られた絶縁紙が表 2.8 の C 系統の 4 種の絶縁紙である。

また、絶縁体の両側（導体上並びに絶縁体上）に使用する遮蔽用半導電層としては特処処理を施したカーボンブラック紙を使用した。このカーボンブラック紙は 275 kV OFケーブルで成功裡に使用されたものであり（図 2.11、2.12 参照）、特殊処理とは、カーボンブラック紙の表面の微細繊維と油とのイオン交換によって生じる損失を押えるための表面処理である。

さらに、絶縁油には、最も安定した性能を有するアルキルベンゼン系合成絶縁油を使用している。

(ii) 絶縁体の構成

導体サイズ 1200 mm² OFケーブルについて、その絶縁体の構成は 2.3.2 節に示したとおりである。

2.5.2 500 kV OFケーブルの電気性能

1200 mm²、2000 mm²、2 種のケーブルを製造し、その電気的性能を把握するため、各種の試験を実施した。^{15)~18)}

(1) わく試験^{15), 16)}

1200 mm²ケーブル 3 枠、2000 mm²ケーブル 1 枠について、各種電気定数の測定、耐圧試験、及び機械的な特性を把握するための曲げ試験とその後の構造解体調

査を行なった。結果は表 2.1.6 に示した通り、いずれも良好な特性を持つことが確認された。

(2) 試料試験 (17), (18), (19)

2 種のケーブルから、1 試験当たり約 2.5 m の試料を採り、試料試験を実施した。
試験内容は

交流耐電圧試験及び破壊試験

インパルス耐電圧試験及び破壊試験

誘電特性測定試験

から成っており、いずれも試料採取後曲げ試験による機械的なストレスを加えた後に試験を実施した。

試験結果は一括して表 2.1.7 に示されており、いずれも設計時点での期待通りの性能を発揮している。

なお、誘電正接の特性については図 2.1.7 に示した。図 2.1.7 中には 1.2.0.0 mm² の場合について材料の特性から理論計算された値も併記している。

表 2.1.6 500 kV OF ケーブルの構造、曲げ、わく試験結果

導体サイズ, わく A_n		1,200 mm ² わく 1	1,200 mm ² わく 2	1,200 mm ² わく 3	2,000 mm ²
静電容量 ($\mu F/km 20^\circ C$)		0.233	0.233	0.232	0.271
絶縁抵抗 ($M\Omega \cdot km 20^\circ C$)		61,000	61,000	61,000	54,000
導体抵抗 ($\Omega/km 20^\circ C$)		0.0149	0.0150	0.0150	0.00913
ガス試験		0.0174	0.0266	0.0285	0.0292
防蝕層絶縁抵抗 ($M\Omega \cdot km 20^\circ C$)		300	290	290	290
誘電正接 (%)	測定温度 ($^\circ C$)	12	12	11	12
	144 kV	0.151	0.151	0.150	0.150
	288 kV	0.154	0.154	0.153	0.153
	398 kV	0.160	0.161	0.159	0.161
耐压試験 (420 kV 10 min)		良	良	良	良
曲げ試験	曲げ径 (mm)	3,000	3,000	3,000	3,100
	結果	良	良	良	良
構造試験結果		良	良	良	良

表 2.17 500 kV OF ケーブルの試料試験結果

ケーブル種類			500 kV 1×1200 mm^2 OF				500kV 1×2,000 mm^2 OF			
交流耐電圧試験			630kV 6 h 良				630kV 6 h 良			
交流破壊試験			870 kV昇圧中(試験用CH外閃)(850kV)				840 kV 2時間(ケーブル中央BD)			
衝撃電圧耐電圧試験			1,860kV 3回 良				1,860kV 3回 良			
衝撃電圧破壊試験			2,130 kV3回目(ケーブル曲り部BD)(2120kV)				2,160kV 1回目(ケーブル立上りBD)			
誘電正接(%)	測定電圧(kV)		144	288	398	580	144	288	398	580
	温度(℃)	20	0.158	0.164	0.167	0.185	0.159	0.167	0.170	0.188
		40	0.150	0.154	0.160	0.177	0.149	0.157	0.162	0.178
		60	0.143	0.147	0.153	0.171	0.142	0.149	0.155	0.172
		80	0.140	0.144	0.150	0.168	0.140	0.147	0.151	0.169
		95	0.144	0.149	0.156	0.173	0.143	0.152	0.158	0.172
		100	0.148	0.152	0.158	0.177	0.148	0.156	0.161	0.178
誘電率(20℃)		3.30				3.33				

注：誘電正接測定時のケーブル温度上昇は外部からの均一加熱によった。
 []内数値は設計時点で期待された破壊電圧

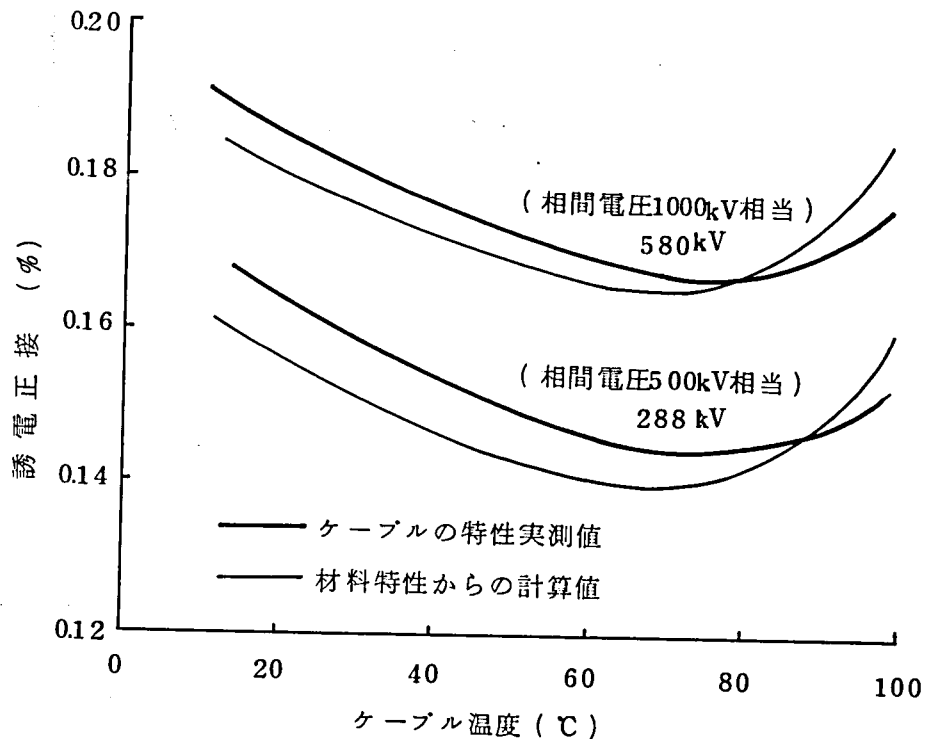


図 2.17 500 kV OF ケーブルの誘電正接 (実測値と計算値の比較)

2.5.3 500 kV OFケーブルの熱的性能

500 kV 大容量送電用ケーブルとして、その熱的性能を把握することは重要である。OFケーブルの熱的性能については275 kV以下のケーブルを用いて検討されていたが、今回の大導体サイズ、厚肉絶縁のケーブルを用いて改めて精密な測定を実施した。

(1) 温度上昇試験による各部熱定数

ケーブルに1000 A～2000 Aの電流を通电し、導体抵抗、シース損を測定するとともに、温度上昇飽和時点の温度差から各部の熱抵抗を求めた。

2000 A通电及び遮断時の各部の温度上昇の時間変化を図2.18に示した。また、導体抵抗と温度上昇測定結果から得られた諸定数を表2.18に示した。表2.18中には理論値を併記したが、実測値とほぼ一致している。

これらの結果から、500 kV $1 \times 2000 \text{ mm}^2$ という大サイズケーブルにおいても、従来の理論値並びにその計算法が有効であることが確認できた。

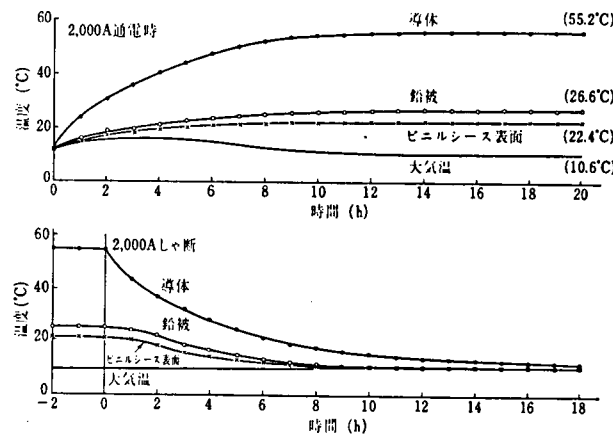


図 2.18 500 kV $1 \times 2000 \text{ mm}^2$ OFケーブルの温度上昇試験結果

表 2.18 5,000 kV 1×2,000 mm² OF ケーブルの
発生損失ならびに熱抵抗

項 目	単 位	測 定 値 (平 均 値)	理 論 値
導体直流抵抗 R _{dc}	$\times 10^{-7} \Omega / \text{cm} (20^\circ\text{C})$	0.890	0.905
導体交流実効抵抗 R _{ac}	"	1.053	1.058
シース損抵抗	$\times 10^{-7} \Omega / \text{cm} (20^\circ\text{C})$	0.052	0.053
シース損係数	%	4.93	5.0
絶縁体熱抵抗 R _i	$^\circ\text{C} \cdot \text{cm} / \text{Watt}$	57.4	58.0
ビニルシース熱抵抗 R _j	"	7.8	8.0

- 注：1. 熱抵抗の理論値を求める場合の固有熱抵抗として
絶縁体 $550^\circ\text{C} \cdot \text{cm} / \text{Watt}$ ビニルシース $450^\circ\text{C} \cdot \text{cm} / \text{Watt}$ を用いた。
2. 導体交流実効抵抗には表皮効果と近接効果が含まれる。

(2) 油圧変化特性

OF ケーブルは正常な油圧が保たれて初めてその性能を発揮する。しかし、ケーブル負荷電流の投入や遮断により発熱量が変化し、これにともなう温度変化がケーブル内の油の膨脹と収縮を惹き起こす。

従来の絶縁厚の薄いケーブルにおいては、長距離ルートの長さ方向の油流に伴なう油圧変化のみを対象とすれば良かった。しかし、一般の OF ケーブル用絶縁油よりはるかに粘度の高い絶縁油を使用した高油圧パイプ型 OF ケーブルでは、単にケーブル長さ方向の油圧変化のみでなく、絶縁体中の半径方向の油圧変化を検討する必要がある、これについては詳細な実験と理論解析を実施しており、^{20)~22)} その結果は付録Ⅱに示されている。

粘度の低い絶縁油を使用したOFケーブルでも絶縁体が厚くなり、しかも絶縁紙自体が表28に示したように高気密度化（絶縁紙を貫通した油流が生じにくくなる）すると、同様の問題が生じる恐れがある。

すなわち、導体側では油通路を通して油が供給、吸収され、正常な油圧に保たれても、絶縁体の外側部では厚い絶縁体を通して油の供給、吸収を行なわねばならないため場合によっては異常な圧力変化を生じる。とくに負荷遮断時の収縮によって絶縁体外側の油圧が急激に低下し、大気圧以下になると、これまで述べてきた材料の絶縁耐力が保てなくなり、ケーブルの絶縁破壊事故を生ずる恐れがある。

このため、500kV $1\times 2000\text{mm}^2$ OFケーブルを用いて負荷電流の投入あるいは遮断時における油圧変化を検討した。実験においては導体に2000Aを通電した場合と遮断した場合の絶縁体外側における油圧変化を測定し、投入時には $0.12\text{kg}/\text{cm}^2$ の上昇遮断時には $0.09\text{kg}/\text{cm}^2$ の下降を生ずることを確認している。また、先の検討結果^{20~22)}を用いた理論解析も試み、投入時に $0.17\text{kg}/\text{cm}^2$ 、遮断時に $0.10\text{kg}/\text{cm}^2$ の油圧変化となる結果を得ている。

以上の検討により、500kV OFケーブルの油圧系統においては負荷変化時の油圧変化量として遮断時に $0.1\text{kg}/\text{cm}^2$ の余裕を見込めば安全であるとの結論が得られる。

2.5.4 500kV OFケーブル用各種接続部の電気性能

ケーブル系統における接続部は、長距離線路の建設において不可欠のものであり、ケーブルと同等の性能が必要となる。ケーブル本体が完全に管理された工場内で製造されるのに対し、接続部は現場での組立作業を要するため、汚損や吸湿、さらに接続作業員の技能により性能が左右され、これらマイナス要素を見込んだ性能を持たせておかねばならない。

このため、ケーブルの開発や性能向上と並行して接続部の開発と改良が要求される。とくに最近では、(i)土地価格の高騰から接続部用の人孔寸法が縮小されているので、これに対処するための接続部の小型化、(ii)工事量の増加にともなう熟練接続作業者の不足を補うため、組立作業の簡易化と省力化及び安定した性能の維持、(iii)大容量送電系統に使用される接続部に過度な熱的負担をかけないための低熱抵抗化など互に矛盾した要求が強く出され、これに対応する接続部の開発を実施している。^{23)~28)}

ここではその代表である500kV OFケーブル用各種接続部について、構造の概略と電気性能をまとめる。¹⁸⁾

(1) 気中終端接続部

気中終端接続部の内部構造は図2.19に示すとおりである。碍管は汚損度 $0.03\text{mg}/\text{cm}^2$ においても一線地絡時の健全相の過電圧394kVに耐え得るよう、漏洩距離:22000

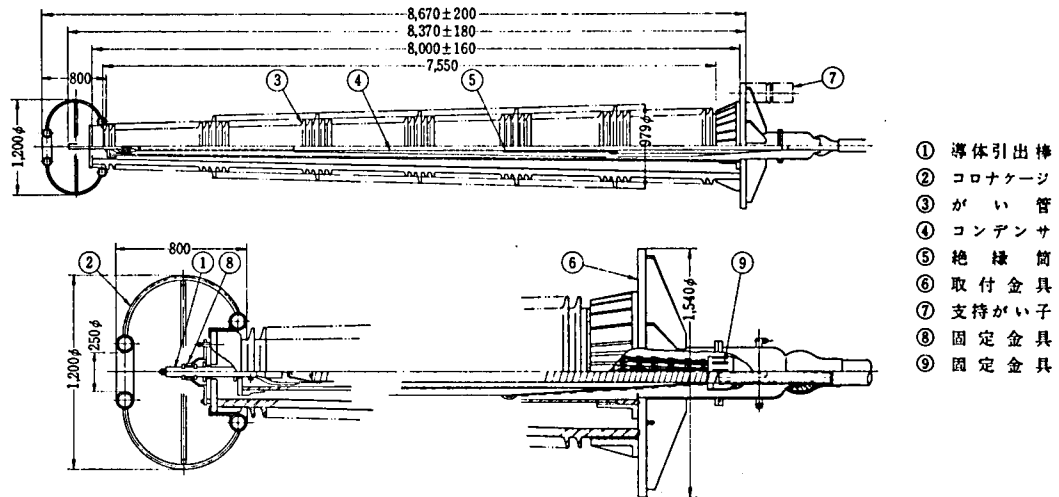


図2.19 500kV OF ケーブル用終端接続部構造

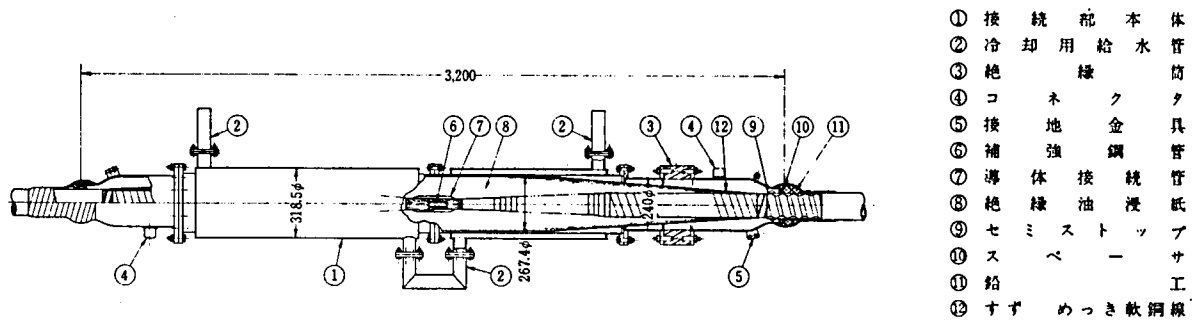


図2.20 500kV OF ケーブル用絶縁接続部構造

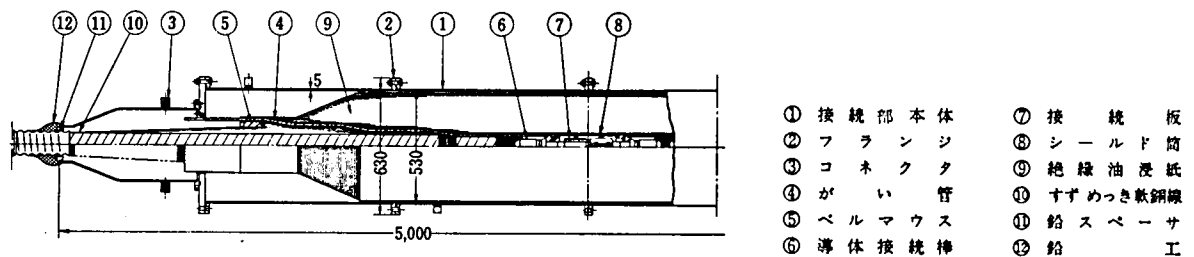


図2.21 500kV OF ケーブル用油止接続部構造

mm、全長：8 mのものを使用した。このような長碍管はすでに製造限界に近く、内圧保証値が8Kg/cm²であるため、常時の使用圧力は2Kg/cm²以下に押えられる。

このため碍管内部にFRP製内圧補強絶縁筒を置き、ケーブル系統には十分な高油圧が許容できる構造をとった。

内部絶縁補強方式としては、275kV級OFケーブルで多くの実績を有するコーン形コンデンサ分圧方式を採用した。ただし、275kV級に比較して、寸法上は約2倍重量的には約10倍の大形なものとなり、組立作業方法の面で多くの改良を実施した。

電気性能は表2.19に示したようにケーブルと同等以上であることが確認されている。

表2.19 各種付属品の試験結果

試験項目 \ 接続部種類	耐汚損終端接続部	SF ₆ 終端接続部	絶縁接続部	油止め接続部
衝撃耐電圧試験	1,860kV(3回良)	1860kV(3回良)	1,860kV(3回良)	1,860kV(3回良)
交流耐電圧試験	630kV(6h良)	630kV(6h良)	630kV(6h良)	630kV(6h良)
交流電圧破壊試験	840kV以上	810kV以上	810kV 2時間40分	840kV以上
衝撃電圧破壊試験	2,190kV以上	2,120kV以上	2,100~2,130kV	2,100~2,190kV

(2) 直線接続部

直線接続部の構造は図2.20の通りである。図中の絶縁筒(③)は、ケーブルシース系統の循環電流を防止するクロスボンディング用として挿入されている。

275kV用接続部のスケールアップでは次項に述べる油止接続部程度の寸法となり組立作業性の点あるいは熱抵抗の点から実用化が困難になると判断し、内部絶縁構造の各部について正確な電界分布の理論解析を行ない縮小化を目的とした形状と寸法の最適化をはかっている。

また、ケーブルの強制冷却に対応し得るよう接続部ケースを二重構造とし、このスペースに冷却水を通水する構造となっている。

電気性能は表2.19に示す実用上十分な値が得られている。

(3) 油止接続部

油止接続部は長距離のケーブル系統において給油区間を分割して各区間毎に絶縁油を供給するために必要である。従って、前項の直線接続部が導体の接続と補強絶縁のみで構成されたのに対し、完全な油密性を得るための油止機構が必要となり、内部構造は複雑となる。

油止接続部の場合も275kV用のものをスケールアップした場合、直径約700mm全長約7mの巨大なものとなり、地下の入孔部において組み立てることは非常に困難

となる。

上記の点を考慮した上で、最終的には図2.21の構造のものが開発されたが、ここに至るまでには多数の試作と理論解析及び改良を行なっている。その主要な点を挙げれば、

- (i) 油止め機構として従来の磁器性碍管に替えて、電気特性の良好なエポキシモールド品を使用している。
- (ii) 終端接続部で採用したのと同様のコンデンサ分圧方式を採用入れ、電界分布を平均化させている。
- (iii) 外部油浸紙層に成形部品を使用し、性能の安定化と作業時間を短縮している。すなわち補強絶縁紙の現場での手巻作業をなくし、いわゆるプレハブ化方式に近い形となっている。

これら改良の結果、大巾な寸法縮小にも拘らず、電気性能は表2.19のようにケーブルや他の接続部と同等の性能となっている。

なお、上記3種の接続部に共通して、部品の大型化と作業量の増加に対処して、高い技術と経験を要する作業部分については予め工場内で処理しておき、現場作業を少なくする設計とした。このため組立時間は275 kV級接続部の組立とほぼ同程度にまで短縮することができた。

以上述べたように、500 kV OFケーブル用接続部として良好な性能のものを開発することができた。

ここで得られた成果は、その後の500 kVケーブルの実線路での接続作業にそのまま活かされただけでなく、超高圧OFケーブル用接続部の全面的な設計の改良と性能向上に役立つものとなっている。

2.5.5 500 kV OFケーブルの絶縁性能に対する考察

275 kV OFケーブルの開発研究の経験と成果を活かして短期間に所期の性能を有する500 kV OFケーブルを得ることができた。この結果を絶縁性能の面から考察する。

(1) 絶縁耐力の向上

500 kVケーブルの破壊電圧は、交流で810～840 kVインパルスで2130 kV以上である。これを破壊強度という点から見直すと、交流で45 kV/mm、インパルスで110 kV/mmとなる。段絶縁設計による最高電界の緩和を考慮すると、各々40 kV/mm、100 kV/mmとなり、材料の破壊強度とほぼ一致する。したがって段絶縁構成による電界緩和により期待された10%の絶縁耐力の向上が果されたことになる。

(2) 誘電体損の低減

500kV O F ケーブルの低損失化の目標値として、 $\epsilon' \cdot \tan \delta < 5 \times 10^{-3}$ を設定していた。完成されたケーブルでは表 217 に示したように $\epsilon' \cdot \tan \delta = 4.9 \times 10^{-3}$ が得られている。表 2 8 の使用絶縁紙中、最も $\epsilon' \cdot \tan \delta$ の小さいものは 150 μ m 紙の 4.7×10^{-3} であり、絶縁体全体では導体側に使用した 80 μ m 紙の 6.5×10^{-3} の影響を受けて多少大きくなっているものの、十分な低損失特性になっていると云える。また、ケーブルで得られた値は材料の特性をもとに (2 2)、(2 3) 式で計算した値と一致している。

(3) 段絶縁構成の効果

500kV O F ケーブルには絶縁耐力向上と誘電体損の低減のため、新たな段絶縁方式を採用し、これが期待通りの効果を発揮したことは上述の通りである。さらに、ケーブルの製造とケーブルの機械特性の向上という面からも段絶縁方式は有効であり、絶縁紙の機械特性と紙巻張力のつりあい、完成したケーブルの曲げに対する良好な性能等総合して絶縁性能の向上に寄与している。

また、製造工程に関して、紙巻時の張力等の理論解析、乾燥や含浸工程の改良と技術の確立等が、使用した材料の特性を充分に発揮させ、設計時点において予想される性能をそのまま実際のケーブルにおいて発揮させている。

このことは、O F ケーブルが、材料、設計、製造のあらゆる面で実用上完成の領域に達しつつあることを示している。

(4) 接続部の絶縁性能

開発された接続部に関して絶縁性能上の問題は生じておらず、直に実用化できる。しかし、今後の 500kV O F ケーブル系統の使用範囲の拡大にともない、より一層の寸法の縮小と作業の簡易化、さらに熱抵抗の低減に対する要請が高まるものと予測される。すでにこれらの要請は 275kV O F ケーブルにおいて現実に生じており、一連の新形接続部の開発を実施している。^{27), 28)}

この意味から、500kV O F ケーブル用接続部については、まだ改良の余地を残しており、今後引続き取り組まねばならない問題である。

(5) 長期劣化の問題

O F ケーブルの絶縁性能が長期間に劣化する要因としては、熱的ストレスと電氣的ストレスがある。それぞれ過度なストレスが加わった場合には絶縁特性の変化を経て最終的には絶縁破壊事故につながる。しかし、275kV O F ケーブルで実証されたように、使用最高温度 80~90℃、電界強度 15kV/mm 前後のストレスに対しては、絶縁特性は低下せずむしろ熟成効果により向上する側に変化する。このことはケー

ルモデルによる材料面からの研究でも明らかになっており、500kV OF ケーブルにおいても成り立つことが予想される。ただし、500kV OF ケーブルは世界的にも実使用された例がないので、実線路における信頼性実証のための試験が実施された。²⁹⁾ その結果、275kV OF ケーブルの場合と同様に、安定した性能を維持することが確認されている。^{30), 31)}

2.6 ま と め

昭和40年代の経済界の急速な成長に対応して、電力需要は著しい伸びを示した。電力会社ではこれに対処して在来設備の増強をはかったが、それだけでは需要をまかなえないことが明らかとなったため、275kV 地中送電システムの都市近郊内部への導入を実施するとともに、500kV 送電システムの建設を開始した。これにともない地中ケーブルの分野での超高压化、大容量化が急務となった。

最初に述べたように、実線路に試験採用し、その実績を見ながら次第に改良し、拡大して行くという従来の地中ケーブルの開発パターンがもはや成り立たず、試作開発すなわち実用化という新しい開発パターンが要求された。

275kV OF ケーブルの開発と実用化を通して得られた成果を活用し、引続き極めて短期間に所期の性能を有する500kV OF ケーブルを開発した。

超高压 OF ケーブルの開発研究により得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 絶縁耐力、誘電特性及び機械的強度にバランスのとれた超高压 OF ケーブル用絶縁紙の特性を決定し、新たな絶縁紙を開発した。
- (2) 上記絶縁紙を採用し、電界分布、誘電特性が最良となる段絶縁方式を確立し、275、500kV OF ケーブルに適用した。
- (3) 275、500kV OF ケーブルを試作試験し、交流絶縁耐力、インパルス絶縁耐力、誘電特性いずれの点に於いても目標性能を有するケーブルを得た。
- (4) 長期課電通電試験、及び最終性能確認試験により上記特性及び絶縁紙の物理、化学特性、金属シースの機械特性の面から、開発したケーブルは十分実用線路に適用可能であると判断した。
- (5) ケーブル本体とともにケーブル線路に欠かすことのできない接続部として、気中終端部、中間普通接続部及び油止接続部を開発し、ケーブルと同等の性能を持つことを確認した。
- (6) 大容量送電用ケーブルにとって重要な特性であるケーブルの熱的特性及び油圧変化特性を実験的、理論的に検討し実用線路において全く問題を生じないことを明らかにした。
- (7) このようにして開発された500kV OF ケーブルは直ちに実線路に活用され、昭和50年に東京電力(株)袖ヶ浦発電所に、世界初の500kV アルミシース OF ケーブル

が布設された。³²⁾

- (7) 500 kV OFケーブルの開発と実用化により、超高圧OFケーブルの材料、絶縁設計、製造技術等に関する開発研究はほぼ完成したと考えられる。

第3章 直流UHV OFケーブルの絶縁設計

1954年にスウェーデンのゴットランド島で世界初の本格的な直流送電が実施され、これに続いて数ヶ所で直流送電系統が建設された。これらはいずれも交流電圧では充電々流増加のために送電不能となる長距離海底ケーブルに直流を適用したものであり、送電容量も200～300 MWに限られていた。一方、1972年に英国に於て、大都市内部の大容量連系用として640 MWの直流ケーブルが運転開始され、直流ケーブルの新たな活用分野として注目された。我国でも北海道と本州を結ぶ±250 kV による600 MW 直流送電系統の建設計画が進み、超高圧直流OFケーブルの本格的な開発研究が要請された。

本章では、直流UHV 500 kV級 OFケーブルを開発目標として、直流ケーブルの基本的な絶縁特性が未解明であることから、まず材料及び250 kV 直流ケーブルを用いて直流絶縁性能上の特異な問題とそれらに対する解決策、並びに試作ケーブルの直流特性についてまとめる。次に、この結果を用い、さらに改良を重ね、500 kV 直流OFケーブルの設計と開発を実施するものである。

3.1 直流絶縁性能に関する特異な問題点とその解決法

3.1.1 直流絶縁の特異性

直流ケーブルと交流ケーブルの相違点は多いが、とくにケーブルの絶縁性能上、注意すべき点は以下の4項目にまとめられる。

(1) 絶縁体内の直流電位分布

絶縁体内の電位分布が固有絶縁抵抗(ρ)によって定まり、絶縁体の ρ は温度と電界によって大きく変化する。したがって負荷電流による導体発熱のため絶縁体内に温度勾配が生ずると、これが電位分布に影響することになる。

交流ケーブルの電位分布は誘電率(ϵ)によって定まり、絶縁体の ϵ は実用的な温度と電界の範囲で一定であるとみなせるため、電位分布も、(2.1)式の電界に示されたように、ケーブル構造で一意的に定まることになる。

このような理由から、直流ケーブルにおいては、負荷条件と電位分布の関係を適確に把握し、各部の電界に見合った絶縁設計を採らねばならない。

(2) 油浸紙の直流絶縁耐力

油浸紙の直流絶縁耐力は、交流の場合と同じく絶縁紙の厚さ、密度、気密度など油浸紙本来の特性に依存するが、さらに、これ以外に温度や残留水分などによる影響を無視することができない。このため、(1)項と合わせて絶縁設計上十分注意する必要がある。

(3) 空間電荷

OF油浸紙の場合、絶縁体を巨視的に見れば、空間電荷の効果を無視できる。しかし油浸紙部と油隙部という微視的構造に対しては空間電荷を考慮しなければならず、これが、次項の異常電圧重畳時の現象に対しては重要となる。

(4) 異常電圧に対する絶縁耐力

直流ケーブルに加わる異常電圧としては、雷サージ、開閉サージのほかに直流系統の固有の現象である潮流反転に伴なり極性反転があげられる。

従来の交流ケーブルの場合、運転電圧に対するサージ電圧の倍数は5～10倍であるのに対し、直流ケーブルでは3倍程度となる。したがって直流ケーブルに於ては、サージの重畳という形で異常電圧を取扱わねばならない。

さらに、異常電圧に対しては、交流と同じく ϵ による電位分布となるので、問題がより複雑となる。

3.1.2 直流ケーブル絶縁体内の電位、電界分布^{33), 34)}

直流ケーブルの絶縁体内の電位や電界を計算する方法として数種の方法があるが、これを分類すると次の三つに大別される。

- (i) 絶縁体の抵抗成分(ρ)に着目し、これに空間電荷を加味して電界のひずみや、過渡的な変化を求める。
- (ii) 絶縁体の容量成分(ϵ)に着目し、これに空間電荷を加味して計算する。
- (iii) ρ 、 ϵ 両者を考慮して計算する。このとき空間電荷は ρ 、 ϵ の分布の相違分として同時に考慮される。

一般には(iii)の方法が用いられ、これを簡略化して、一定直流電圧に対しては ρ 成分で計算し、サージ重畳や極性反転時には ϵ 成分で定まる電界を重畳するという方法が採られている。直流ケーブルの開発に最も基本的問題となるので、以下に電界分布計算法について詳細な検討を行なう。

(1) 直流電圧に対する電界

従来、直流ケーブル絶縁体内の電位及び電界については巨視的な空間電荷が無視できるので、 $\sigma = \rho$ の式をもとに求められている。

$$\text{div}(\text{grad}V) = -(\text{grad}V \cdot \text{grad}\sigma)/\sigma \quad (3.1)$$

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp[\alpha T + \beta |\text{grad}V|] = 1/\rho \quad (3.2)$$

V : 電位 (volt)

T : 温度 (°C)

σ : 絶縁体の電導度 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)

$\left. \begin{matrix} \sigma_0 \\ \alpha \\ \beta \end{matrix} \right\} : \sigma \text{ の温度、電界依存性を示す定数}$

運転状態での電位や電界を求める場合には、絶縁体内の洩れ電流による発生熱を無

視することができるので、(3.1)、(3.2)式を解くことにより妥当な電位及び電界が求められる。しかし、苛酷な条件下での破壊試験時には絶縁体内の発生熱を無視することはできず、これによる温度上昇が(3.2)式の関係で絶縁体の電導度の変化をもたらし、電位及び電界分布に影響する。すなわち、(3.1)、(3.2)式のみからは正解が得られない。ここでは新たに、これを考慮して温度分布を定めるポアソンの式を導入し、次式を用いる。

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} T) = -\sigma(\operatorname{grad} V)^2/k - (\operatorname{grad} T \cdot \operatorname{grad} k)/k \quad (3.3)$$

ここに k : 絶縁体の熱伝導度 ($W/({}^{\circ}C, cm)$)

(3.1)～(3.3)、電位境界条件(導体側： V_{DC} 、シース側： 0)、温度境界条件(導体側：発熱量、シース側：既知温度)を組み合わせることにより、絶縁体中の電位、温度分布、さらに電界分布が求められる。すなわち、(3.1)、(3.3)式を各々円筒座標で書き改め、

$$\begin{aligned} \frac{d^2 V}{dr^2} = & -\left(\frac{1}{\sigma_0} \frac{d\sigma_0}{dr} + \frac{d\alpha}{dr} T + \alpha \frac{dT}{dr} - \frac{d\beta}{dr} \frac{dV}{dr} + \frac{1}{r} \right) \\ & \times \frac{dV}{dr} \times \left(1 - \beta \frac{dV}{dr} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\frac{d^2 T}{dr^2} = -\left\{ \frac{1}{k} \frac{dk}{dr} \frac{dT}{dr} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{\sigma_0}{k} \left(\frac{dV}{dr} \right)^2 \exp \left[\alpha T - \beta \frac{dV}{dr} \right] \right\} \quad (3.5)$$

を導き、これにRunge-Kutta-Gill法を適用して繰り返し計算を行なう。

この方法の特徴は、(3.3)式で絶縁体の発熱を考慮していることおよび $d\sigma_0/dr$ 、 $d\alpha/dr$ 、 $d\beta/dr$ 、 $dk/dr \approx 0$ とすることにより、異なった特性の絶縁紙を組み合わせた場合の電界も計算できる点にある。これにより直流ケーブルにおける段絶縁設計あるいは破壊試験データの十分な解析が可能となる。

(2) 異常電圧重畳ならびに極性反転時の電界

まず、巨視的な電界について考察する。

巨視的に見れば、OF油浸紙の場合空間電荷の影響を無視することができるので、異常電圧重畳時の電位と電界は、抵抗成分と静電容量成分各々で別個に決定される電位或いは電界を重畳することによって求め得る。

すなわち、次式が成り立つ。

$$V_p = V_{DC} + V_{sg} \quad (3.6)$$

$$E_p = E_{DC} + E_{sg} \quad (3.7)$$

ここに、 V 、 E は各々電位、電界であり、添字 p 、 DC 及び sg は各々、重畳後の

成分、直流成分及びサージ成分を意味するものとする。

極性反転時には、 $V_{sg} = -2 \times V_{DC}$ と考えれば等価となる。(3.6)、(3.7)

はいずれも対象とする異常電圧の時間領域が絶縁体の充放電時定数 $\epsilon\rho$ に比して無視できる場合に成り立つ。直流送電系統における異常電圧は、数m秒の時間オーダーであり、OFケーブルの $\epsilon\rho$ が数秒以上のオーダーである。したがって、(3.6)、(3.7)式は十分成立することになる。さらに長時間領域の電位、電界に対しても V_{sg} を異常電圧のピーク値にとれば、(3.6)、(3.7)が安全側最大値を与えることになる。

次に油浸紙部と油隙部に着目した微視的な電界について考察する。

OFケーブル絶縁体の微視的構造は、図3.1中に示したように、油浸紙部と油隙部が積層されている。この組み合わせを一体とみなしたとき、前述の巨視的電界が成り立つが、この内部においては(3.7)式は成り立たない。

この点については図3.2の2層構造で考察する必要がある。

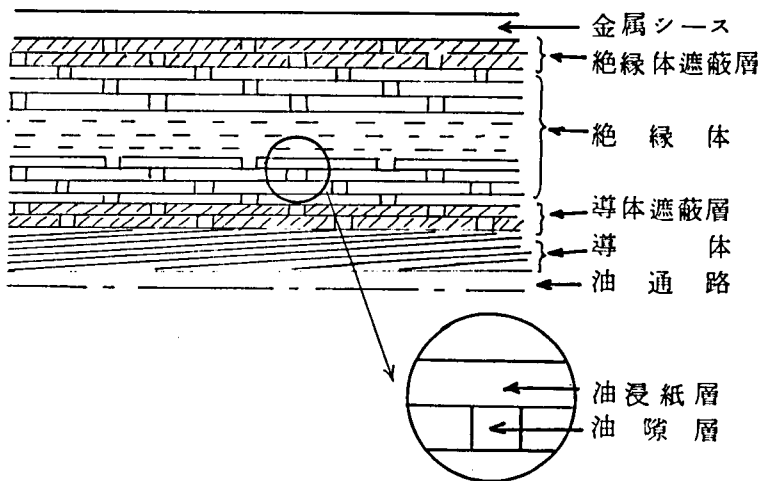


図 3.1 OFケーブル絶縁体構造

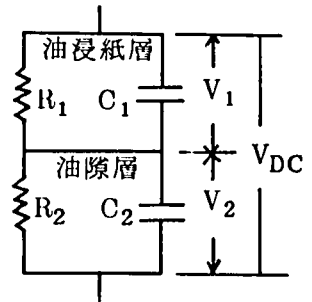


図 3.2 絶縁体等価回路

2層絶縁体に直流電圧 V_{DC} を印加した後の電圧分担は

$$V_{DC} = V_1 + V_2$$

$$I = p C_1 V_1 + V_1 / R_1 = p C_2 V_2 + V_2 / R_2$$

$$p = d / dt$$

(3.8)

(3.8) 式を V_1 と V_2 について解くと

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_{DC} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{C_2 R_2}{\tau} \right) e^{-t/\tau} \right\} \\ V_2 &= V_{DC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{C_1 R_1}{\tau} \right) e^{-t/\tau} \right\} \\ \tau &= \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

このとき、第一層と第二層の境界部には

$$Q = \frac{C_2 R_2 - C_1 R_1}{R_1 + R_2} V_{DC} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.10)$$

だけの電荷が蓄積される。

即ち、電圧印加直後 ($t = 0$) には $Q = 0$ となり、いわゆる誘電率による電圧分担が成り立つ。また、直流電圧の定常時 ($t \rightarrow \infty$) には、 $Q = (C_2 R_2 - C_1 R_1) V_{DC} / (R_1 + R_2)$ が最大となり、いわゆる抵抗分圧が成り立つ。

このように、微視的構造に着目すると直流電圧印加後、長時間経過すれば境界部に空間電荷が蓄積されるので、その後の電圧変化に対してはこれを考慮する必要がある。

今、油浸紙層と油隙層全体に直流平均電界 E_{DC} が加わり、定常状態に達した後、 $t = 0$ で平均電界が E_p に変化した場合、各層の電界は次式で表わされる。(付録Ⅲ参照)

$$\left. \begin{aligned} \text{油浸紙層 (厚さ } a) : E_{p1} &= \frac{\rho_1 E_p}{a\rho_1 + b\rho_2} - \frac{b(\epsilon_1 \rho_1 - \epsilon_2 \rho_2)}{(a\rho_1 + b\rho_2)(b\epsilon_1 + a\epsilon_2)} (E_p - E_{DC}) e^{-t/\tau} \\ \text{油隙層 (厚さ } b) : E_{p2} &= \frac{\rho_2 E_p}{a\rho_1 + b\rho_2} + \frac{a(\epsilon_1 \rho_1 - \epsilon_2 \rho_2)}{(a\rho_1 + b\rho_2)(b\epsilon_1 + a\epsilon_2)} (E_p - E_{DC}) e^{-t/\tau} \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

$$a + b = 1$$

以上の巨視的、微視的な考察をケーブルの絶縁耐力という観点からまとめると次のようになる。

- (i) OFケーブル絶縁体の充放電時定数は、直流系統に発生する異常電圧の時間領域よりもはるかに大きいので、異常電圧重畳時の電位と電界は、常時印加されている直流電圧に対する電位や電界に重畳された異常電圧の最大値に対する電位や電界を加えることにより、(3.6)、(3.7)式により求め得る。
- (ii) (3.7)式で求めた重畳時の電界は絶縁体を一体構造とみなした場合の値であり、OFケーブル絶縁体構造の油浸層と油隙層を考慮すると、各々の層に加わる

電界は、(3.1 1) 式となる。

すなわち、①ケーブル絶縁体を一体とみなしたとき、直流電圧に対する電界を 4.2 1 節に述べた方法により $E_{DC} = -dV_{DC}/dr$ として求める。

②次に重畳される異常電圧の最大値 V_{SG} に対し、同軸円筒としての電界或いは (2.1) 式によりサージ性電界 E_{SG} を求める。

③(3.1 1) 式に (3.7) 式の関係を用いて、 E_{DC} 、 E_{SG} を代入すると油浸紙層、油隙層の最大電界として次式が導出される。

油浸紙層：

$$\left. \begin{aligned} E_{p1} &= \frac{\rho_1}{a\rho_1 + b\rho_2} E_{DC} + \frac{\epsilon_2}{a\epsilon_2 + b\epsilon_1} (E_{SG} - E_{DC}) \\ \text{油 隙 層：} \\ E_{p2} &= \frac{\rho_2}{a\rho_1 + b\rho_2} E_{DC} + \frac{\epsilon_1}{a\epsilon_2 + b\epsilon_1} (E_{SG} - E_{DC}) \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

以上のようにして、各部の電界を求め得る。

なお、絶縁性能上は、油浸紙部あるいは油隙部自体の破壊強度との関連で (3.1 2) を検討しなければならない。

(3.1.5 節参照)

3.1.3 油浸紙材料の直流特性

油浸紙材料の直流電圧に対する諸特性の一般的な事項については、多くのデータが報告されており、また、3.1.4 節でも触れるので、ここでは重複を避けて 3.1.1 と関連した特異な項目について検討する。

(1) 直流破壊強度の温度依存性³⁵⁾

OF 油浸紙の直流破壊強度は 110 kV/mm 程度であり、紙厚、密度、気密度などによって $100 \sim 140 \text{ kV/mm}$ となり得る。このような絶縁紙本来の特性以外に、温度による破壊強度の低下を無視することができない。³⁹⁾

1.5 mm 絶縁厚のケーブルモデルにより、直流破壊強度の温度依存性を求めたものが 図 3.3 である。

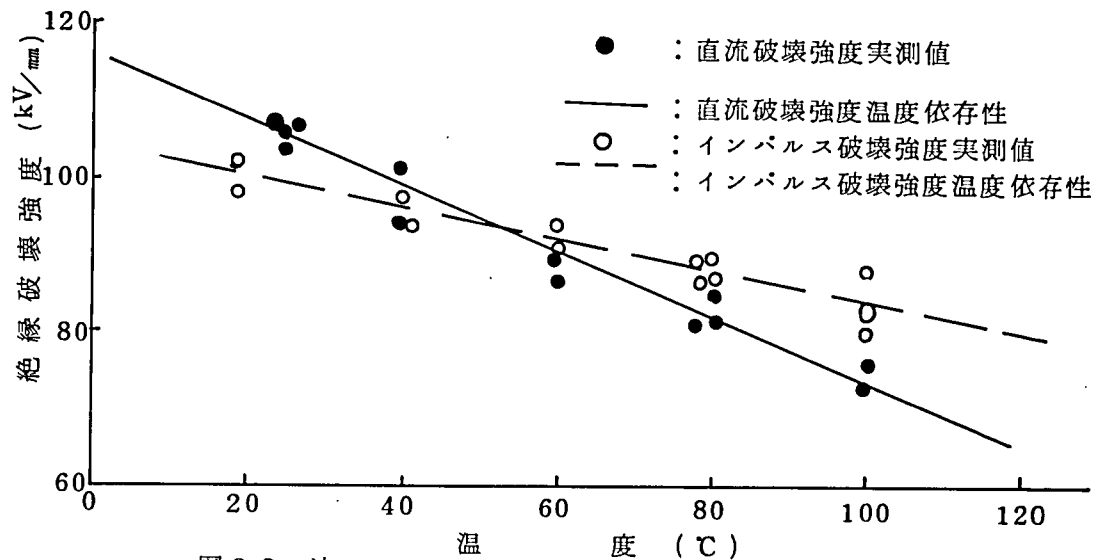


図 3.3 油浸紙の直流及びインパルス破壊強度の温度依存性

図 3.3 中には直流破壊強度とともにインパルス破壊強度の温度依存性が示されている。これより明らかなように、直流の場合はインパルスの場合以上に温度依存性が強く、90°C 付近では常温の約 70% に低下している。

このような破壊強度の強い温度依存性は、直流ケーブル絶縁体中の電界分布と合わせて絶縁設計上考慮しなければならない。

(2) 固有絶縁抵抗の残留水分量依存性³³⁾

油浸紙の固有絶縁抵抗 ρ は (3.2) 式に示した温度と電界への依存性を持っている。しかし ρ は油浸紙中の残留水分量にも強い依存性を持ち、その実測結果の一例が図 3.4 に示されている。

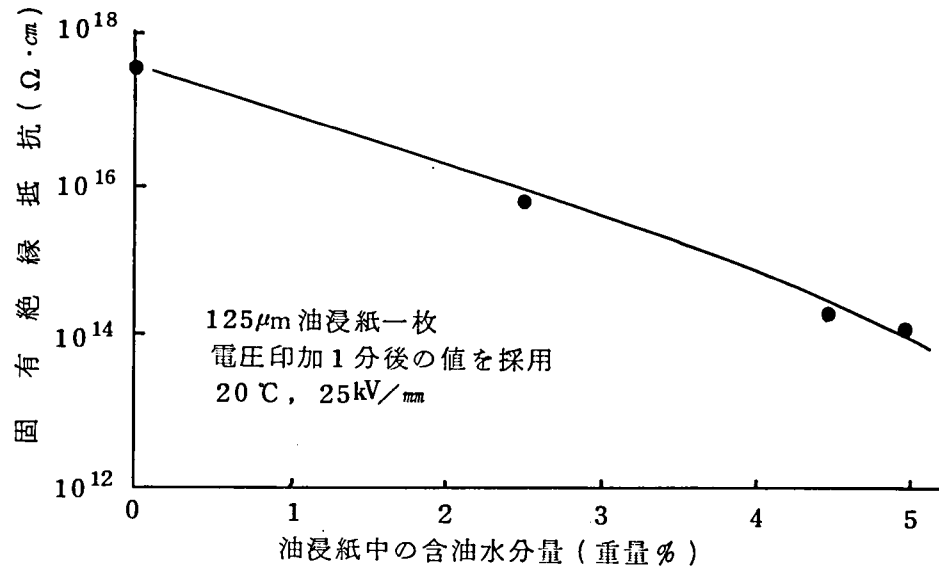


図 3.4 油浸紙の固有絶縁抵抗の
残留水分量依存性

(3.2) 式中の定数のうち α , β は含油水分量により余り変化しないが, $\rho_0 (=1/\sigma_0)$ は水分量が 1% 増すと約 1 桁低下する。

ケーブル本体は工場で十分乾燥され、水分量は 0.1% 以下に保たれているので安定した絶縁抵抗となるが、ケーブル接続部の組立時には部分的な吸湿を避けることができない。このため、組立後真空乾燥されるが、このときの残留量が多いと部分的に ρ が低下する。 ρ 低下部分の電圧分担は軽減されるが、その分だけ他の部分の電圧分担は大きくなり、局部的な高電界が生じ、絶縁破壊の発端となる。また、含油水分量の増加により、破壊強度自体も低下するので、接続部の組立時の吸湿と残留水分の除去には嚴重な注意が必要である。

3.1.4 空間電荷と異常電圧重畳時の破壊強度

油浸紙絶縁ケーブルの空間電荷は (3.10) 式により理論的に求められ、その発生源としては油中の微量不純物のイオン化が考えられる。しかし、実際にこれを確認した例は見られない。そこで、高分子の空間電荷検出方法として使用されている、熱刺激電流を用いて OF 油浸紙中の空間電荷の検出を以下のように試みた。³⁶⁾

試料ケーブルを使用温度に加熱した後、一定の直流電圧 V_b を印加し、定常状態まで充電する。電圧を印加したまま試料を急冷し、電荷を凍結させる。その後電圧を遮断し、両

電極を短絡する。このとき幾可学的静電容量分は放電されるが、分極等によって蓄積された電荷は凍結されたままとなっている。この状態で試料温度を一定の率で上昇させると電荷はその活性化エネルギーに応じて解放され、放電々流として流れ熱刺激電流として測定される。絶縁厚 6 mm の OF ケーブルを用いた熱刺激電流測定結果が図 3.5(a)である。温度依存性から活性化エネルギーを求めると約 0.40 eV となり、この値は、従来交流課電下の誘電正接の温度依存性から求められた値とほぼ一致する。また、熱刺激電流のピーク値と

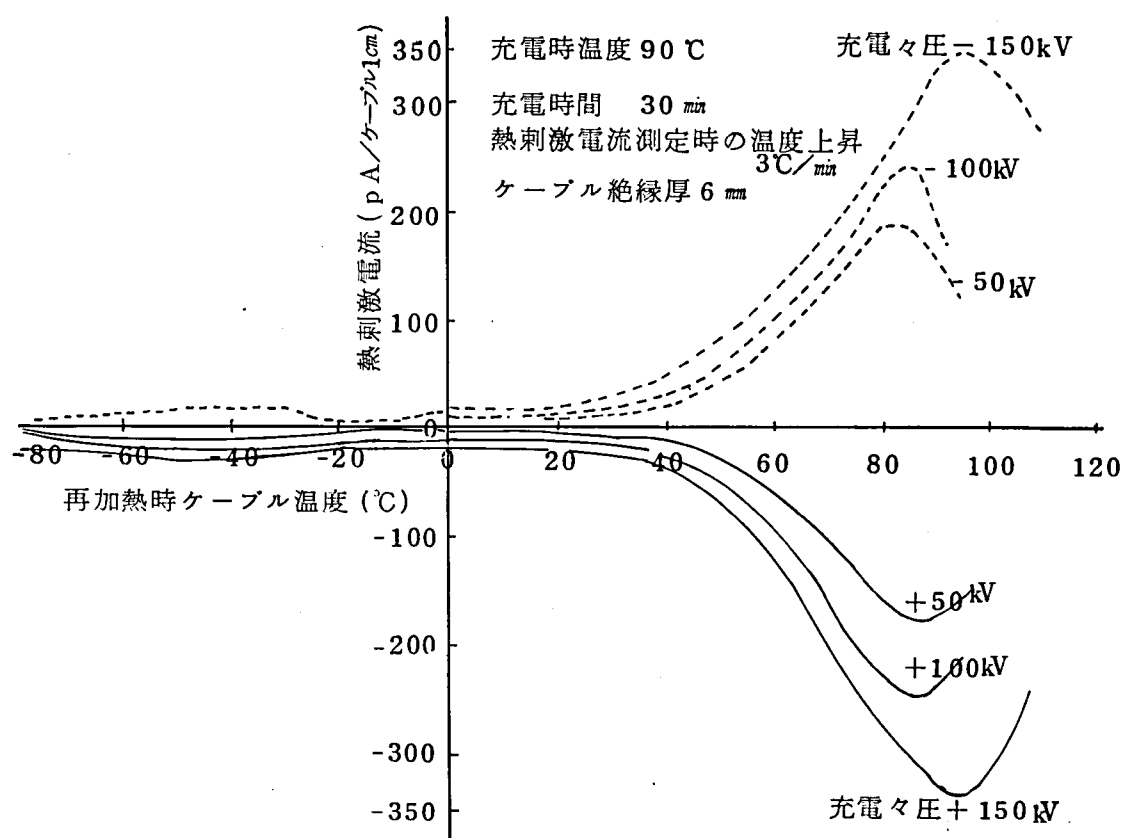


図 3.5 (a) OF ケーブル充電後の熱刺激電流

印加電圧の関係は図 3.5 (b)となり、分極電荷の特徴である直線性が成り立つ。

以上の結果から、OF 油浸紙中に蓄積された空間電荷は、イオン分極によって生じた分極電荷が主体であることが明確となる。

3.1.5 異常電圧重畳時の破壊強度

油浸紙に直流電圧を印加した後、異常電圧、とくにインパルス電圧を重ねたときの破壊特性については、いくつかの検討がなされており、その一例が図 3.6 であり、³⁷⁾条件の詳細は図中に示された通りである。横軸の直流電界 E_{DC} に対し、縦軸は重畳後のピーク値

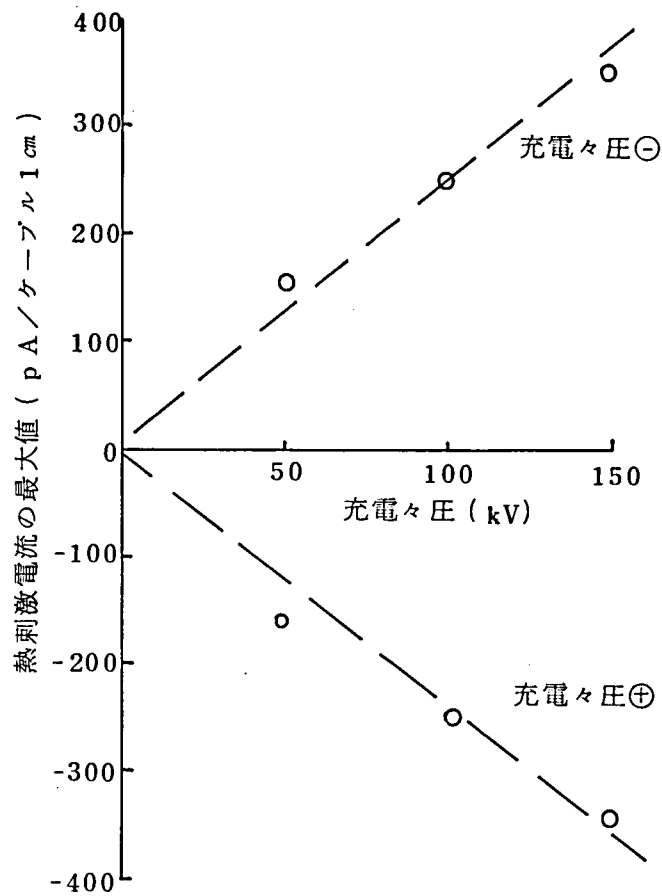


図 3.5 (b) 熱刺激電流最大値の電圧依存性

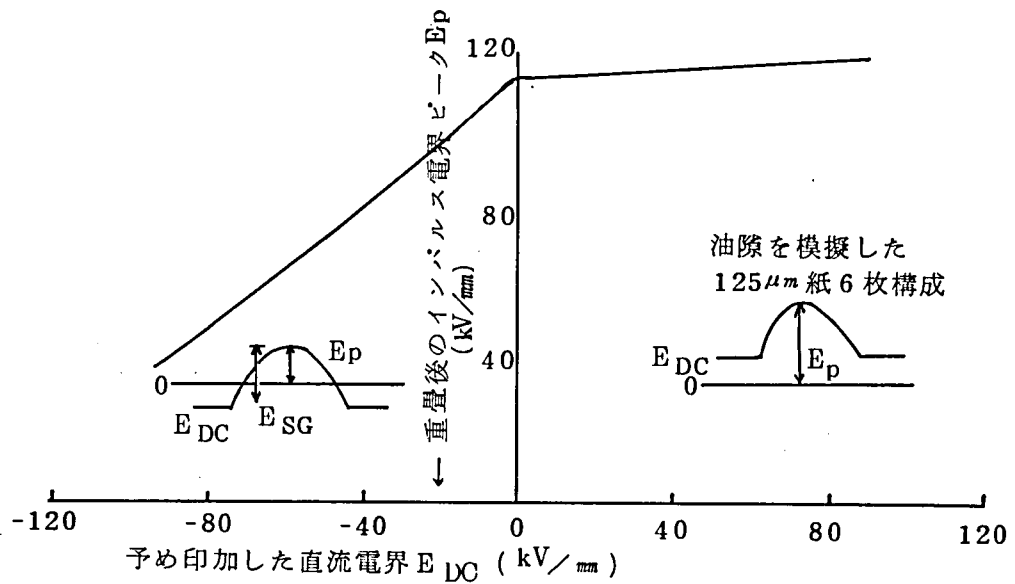


図 3.6 直流にインパルスを重ねた場合の破壊時電界強度

E_p で表示されている。インパルス電圧と直流電圧が逆極性の場合には、電界の変化分 ($E_p - E_{DC} = E_{sg}$) で、ほぼ破壊が決定されていることがわかる。

この結果を先の (3.12) 式を用いて数値的に検討してみる。使用した各定数は表 3.1 のとおりである。

表 3.1 異常電圧重畳時の微視的
電界計算に用いた定数

項 目 \ 層 別	油 浸 紙 層	油 隙 層
厚 さ 比 率※	$a = 2/3$	$b = 1/3$
比 誘 電 率	$\epsilon_1 = 4.0$	$\epsilon_2 = 2.3$
固有抵抗 ($\Omega\text{-cm}$)	$\rho_1 = 3.0 \times 10^{18}$	$\rho_2 = 1.0 \times 10^{17}$

注) ※ 図 4.1 に示したように OF ケーブル絶縁紙は次段との重なりを $2/3$ として巻かれる。このため、理想的に仕上がった絶縁体では、油浸紙層 2 に対し、油隙層 1 の配置となる。

まず、直流電圧の単独の破壊強度は、約 100 kV/mm であるが、このとき油浸紙及び油層に加わる電界は

$$E_{1 \text{ DC}} = 147 \text{ kV/mm}, \quad E_{2 \text{ DC}} = 5 \text{ kV/mm}$$

また、インパルス単独の場合の破壊強度 110 kV/mm に対し

$$E_{1 \text{ SG}} = 88 \text{ kV/mm}, \quad E_{2 \text{ SG}} = 153 \text{ kV/mm}$$

が求められる。油浸紙自体の方が油層よりも高い破壊強度を有しているが、直流の場合 $E_1 \gg E_2$ となるため油浸紙層が破壊する。インパルスの場合は $E_1 < E_2$ となり、油層から破壊していることがわかる。

次に重畳時の破壊強度を、図 3.6 の $E_{DC} = 60 \text{ kV/mm}$ の場合の同極性、逆極性について検討する。すなわち、

同極性の場合 $E_{DC} = 60, E_p = 110 \text{ kV/mm}$ であり、

$$E_{1 \oplus} = 129 \text{ kV/mm}, \quad E_{2 \oplus} = 69 \text{ kV/mm}$$

逆極性の場合 $E_{DC} = 60, E_p = -120 \text{ kV/mm}$ であり、

$$E_{1 \ominus} = -8 \text{ kV/mm}, \quad E_{2 \ominus} = -163 \text{ kV/mm}$$

$E_{1 \text{ DC}} \oplus$ と $E_{1 \text{ SG}} \ominus$, $E_{2 \text{ DC}} \oplus$ と $E_{2 \text{ SG}} \ominus$ が近い値となるが、十分一致しているとは云えない。 $E_{1 \text{ DC}} \oplus$ と $E_{1 \text{ SG}} \ominus$ の差は直流とインパルス破壊機構の差と考えられるが、 $E_{2 \text{ DC}} \oplus$ と $E_{2 \text{ SG}} \ominus$ の差は、このような機構の差のみで生じているとは考えられない。

$E_{2 \text{ SG}} \ominus < E_{2 \text{ DC}} \oplus$ となっていることから、(3.12) 式及び表 3.1 の定数を用いて計算された

E_2 が実測値よりも大きく評価されていることになる。すなわち (3.12) 式導出時には予め加えられていた直流電圧による空間電荷が 100% 残留しているとして、サージ重畳時の電界を求めているが、実際にはその一部はサージ重畳に追従して解放されているものと考えられる。

このような残留電荷の逃げを実験から求め、サージ重畳時の現象を解析することも試みられている。³⁸⁾ しかし、絶縁設計上の検討という観点からは、苛酷な側に評価すべきであり空間電荷は 100% 残留しているものとみなして以下の検討を進めている。

3.2 直流ケーブルの絶縁設計

3.2.1 電位分布試算例³³⁾

前節の考え方をういて種々の条件におけるケーブル絶縁体内の電位分布を試算する。対象としたケーブルは次節の破壊試験と関連させて直流 250 kV 1×400 mm² OF とする。ケーブル構造を表 3.2 に、また導体、絶縁体の定数を表 3.3 に示す。

表 3.2 試作 250 kV 直流 OF ケーブルの構造

項 目		単 位	数 値
油 通 路 内 径		$\phi \text{ mm}$	14
導 体	断 面 積	mm^2	400
	外 径	$\phi \text{ mm}$	30.6
絶 縁 体	導 体 遮 蔽 層 厚	mm	0.3
	絶 縁 体 厚	mm	12.4
	絶 縁 体 遮 蔽 層 厚	mm	0.3
鉛 被 厚		mm	2.9
防 食 層 厚		mm	5.0
外 径		$\phi \text{ mm}$	72.4

表 3.3 250 kV 直流ケーブルの各種定数

項 目		単 位	数 値
導 体 抵 抗 (20℃)		Ω / cm	0.441×10^{-6}
抵 抗 温 度 係 数		$1 / ^\circ C$	0.00393
絶 縁 体 固 有 熱 抵 抗		$^\circ C \cdot cm / watt$	550
絶 縁 体 固 有 絶 縁 抵 抗	ρ	$\Omega \cdot cm$	2.0×10^{19}
	α	$1 / ^\circ C$	0.10
	β	mm / kV	0.04
比 誘 電 率		—	3.5
直 流 破 壊 強 度	破 壊 強 度 (0℃)	kV / mm	120
	温 度 係 数	$kV / mm \ ^\circ C$	0.42
イ ン パ ル ス 破 壊 強 度	破 壊 強 度 (0℃)	kV / mm	110
	温 度 係 数	$kV / mm \ ^\circ C$	0.20

計算条件は、防蝕層を含めた周囲の熱抵抗を $100^\circ C \cdot cm / watt$ とし、運転電圧直流 250 kV を基準とした。

図 3.7 は直流ケーブルの特徴であるケーブル運転時のシース側の高電界発生を明確にするため、負荷電流による導体側、シース側の電界変化を示したものであり、負荷電流が 500 A 程度以上ではシース側に最高電界が発生することがわかる。

なお、図 3.7 中には参考のため同一ケーブルに交流 250 kV を印加した場合の電界も併記した。

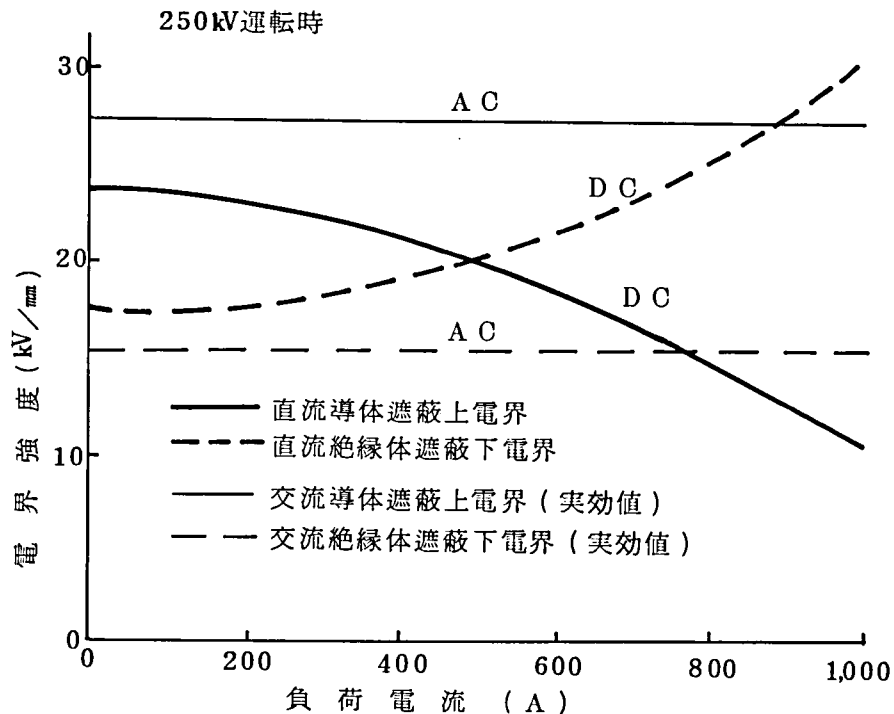


図 3.7 250 kV 直流 OF ケーブル絶縁体内の電界の負荷電流による変化

次に、図 3.8 は負荷電流を 800 A としたときの様々な電圧条件のもとでの絶縁体半径方向の電界分布計算結果を示したものである。ただし、インパルス電圧は直流と逆極性であるとし、先に記したように電界の変化分をみかけの電界として表示した。最大電界は無負荷でインパルスが重畳したときに導体側に発生する。ただし、絶縁破壊強度に対する裕度という点からみれば、後述の表 3.5 に示すように負荷時のインパルス重畳が最も苛酷となる。

以上の結果は、すべて絶縁体が表 3.3 に示された均一な特性を持つときの計算値であるが、さらに絶縁体に使用する絶縁紙を種々変えて、表 3.4 に示す段絶縁構成になっている場合を想定して計算する。

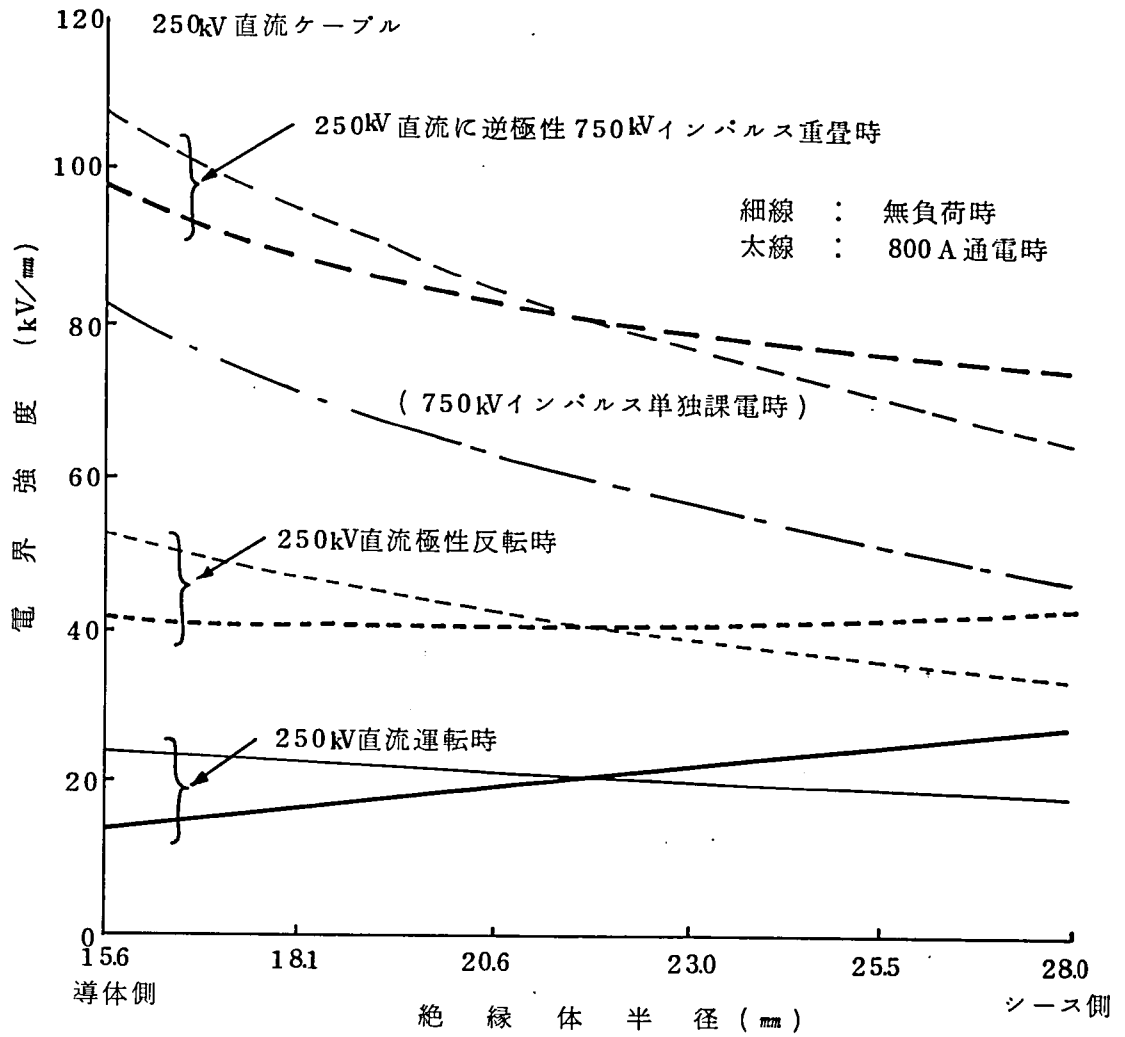


図 3.8 250 kV 1 × 400 mm 直流 OF ケーブル絶縁体内電界分布
(インパルス重畳、極性反転時は絶縁強度を評価するための
みかけの電界)

表 3.4 250 kV 直流 OF ケーブルの絶縁体構成 (想定)

絶縁体 厚 さ (mm)	使用絶 縁紙厚 (μm)	σ_0 ($\times 10^{-19}$) ($1/\Omega \cdot \text{cm}$)	α ($1/^\circ\text{C}$)	β (mm/kV)	ϵ (比誘 電率)	k ($\times 10^{-2}$) ($\text{watt}/^\circ\text{C} \cdot \text{cm}$)	直 流 破 壊 強 度 (kV/mm)	同 左 温 度 係 数 ($\text{kV}/\text{mm}^\circ\text{C}$)	インパルス 強 度 (kV/mm)	同 左 温 度 係 数 ($\text{kV}/\text{mm}^\circ\text{C}$)
1.24	80	0.80	0.104	0.040	4.2	0.190	130	0.42	120	0.20
1.24	100	0.75	0.103	0.039	4.0	0.185	125	0.42	110	0.20
1.24	125	0.70	0.103	0.039	3.8	0.185	120	0.42	110	0.20
7.44	150	0.65	0.102	0.038	3.6	0.182	120	0.42	105	0.20
1.24	80	0.80	0.104	0.040	4.2	0.190	130	0.42	120	0.20

計算結果の一例は図 3.9 に示されており、直流運転電圧にインパルスが重畳したとき、均一絶縁であれば、導体側のみかけの電界が材料の破壊強度を越え、理論上は絶縁破壊を生ずる領域となるのに対し、段絶縁の場合 ρ 、 ϵ ならびに破壊強度の組み合わせにより、発生電界が破壊強度より低く押えられていることが明確となる。

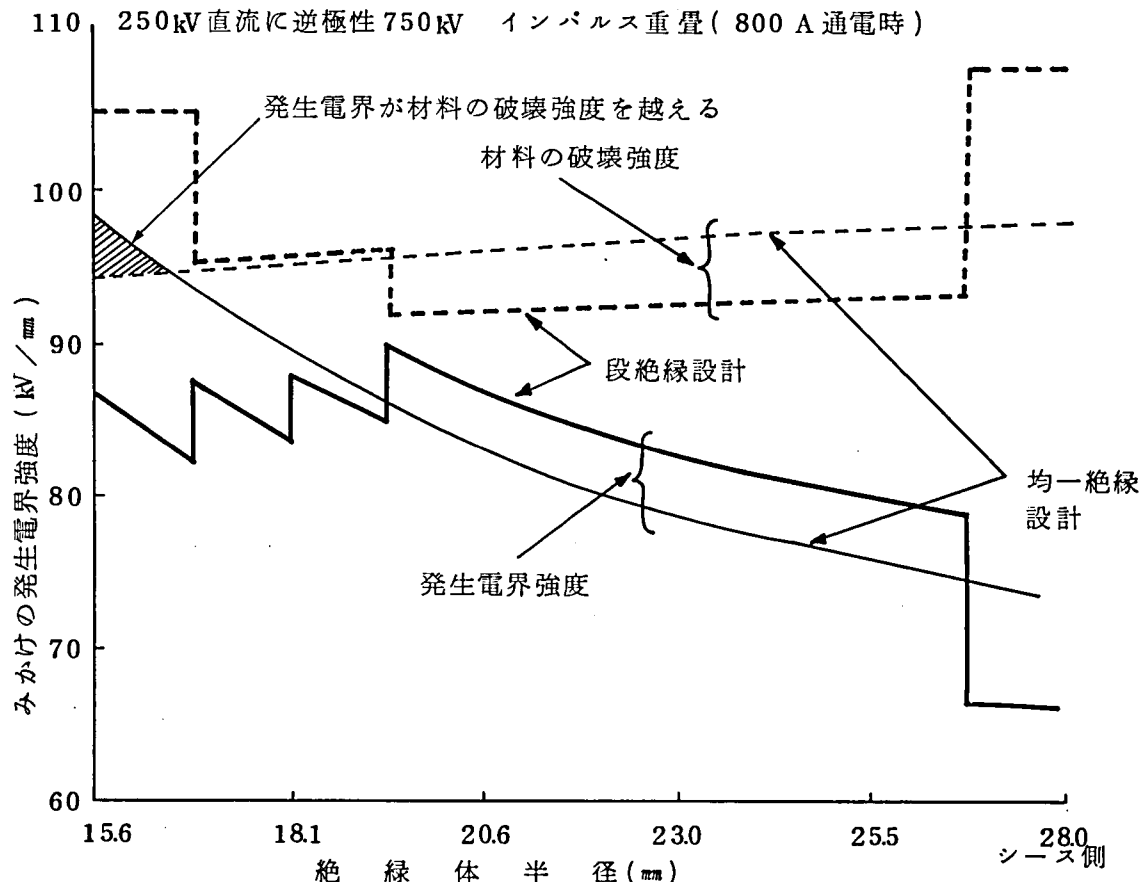


図 3.9 均一絶縁と段絶縁ケーブルのインパルス重畳時の電界分布ならびに材料の破壊強度

表 3.5 種々の電圧，電流下における絶縁体中の弱点とそこにおける電界，破壊強度

負荷電流 (A)	電 圧 (kV)	均 一 絶 縁				段 絶 縁			
		弱点となる 位 置 r (mm)	発生電界 E_0 (kV/mm)	絶縁破壊 強度 E_B (kV/mm)	比 率 (E_B/E_0)	弱点となる 位 置 r (mm)	発生電界 E_0 (kV/mm)	絶縁破壊 強度 E_B (kV/mm)	比 率 (E_B/E_0)
負荷なし OA	直流電圧250kV	15.6	23.7	110	4.6	19.3	22.3	110	4.9
	直流電圧250kV 極 性 反 転	15.6	52.2	105	2.0	19.6	45.7	100	2.2
	直流電圧250kVに 逆極性インパルス 750kV 重畳	15.6	10.8	105	0.97	19.6	92.7	100	1.08
負荷あり 800A	直流電圧250kV	28.0	26.5	94.9	3.6	26.5	27.1	94.4	3.5
	直流電圧250kV 極 性 反 転	15.6	41.6	94.6	2.3	26.5	44.4	92.8	2.1
	直流電圧250kV に逆極性インパルス 750kV 重畳	15.6	97.2	94.6	0.96	19.3	89.3	90.9	1.02

直流運転時、極性反転時についても同様の計算を行ない、発生電界に対する破壊強度の倍数が最小となる場所（弱点）とその場所における値をまとめると表 3.5 を得る。

表 3.5 から以下の点が明らかとなる。

- (i) 発生電界強度は、無負荷でインパルスが重畳した場合に最高となる。ただし、材料の破壊強度の相違、温度による変化を勘案すれば、最も苛酷な状態となるのは全負荷時にインパルスが重畳した場合である。
- (ii) 均一絶縁ではインパルス重畳時に発生電界が破壊強度を越えるため、インパルスレベルを下げるかケーブル絶縁厚を厚くする方法を取らなければならない。しかし段絶縁を採用すれば、発生最大電界を材料の破壊強度内に押えることができる。

ただし、上記(i)、(ii)項はこの試算例についていえることであって、負荷条件、材料の特性、段絶縁方式が変れば、異なった結論を得ることもあり得る。

直流ケーブルに段絶縁を採用することにより、電界分布を緩和できるか否かはまだ実

測データとして十分明らかにされていない。しかし、第2章に詳細に述べたように交流ケーブルにおいて誘電率を変えることにより電界を緩和する段絶縁設計が採用されており、直流ケーブルにおいても効果があると考えられる。少くとも誘電率の異なった絶縁紙を組み合わせて使用することにより、直流ケーブルとして最も苛酷なストレスとなるインパルス重畳時の破壊電圧を上昇させる効果は十分期待できる。

3.3 250 kV 直流 OF ケーブルによる絶縁耐力の検討^{39)~40)}

前節までに直流ケーブルの絶縁特性に関して理論的及び材料的に検討したが、これらの結果が実際のケーブルで成り立つか否かを250 kV級直流OFケーブルを用いた諸試験により検証し、最終のUHV 500 kV 直流OFケーブル開発の参考とした。

3.3.1 試作ケーブルの構造と特徴

試作250 kV $1 \times 400 \text{ mm}^2$ 直流OFケーブルの構造は表3.2に示したとおりである。既設の250 kV 直流ケーブルのインパルスレベルは運転電圧の3倍程度に採られており、今回もこれを踏襲して750 kVとしている。この値が現在の交流154 kV OFケーブルのBILと一致するため、絶縁厚さも交流154 kV OFケーブルと同等になる。

なお、絶縁紙としては従来の交流ケーブル用絶縁紙の中から、後述するような特性の80~150 μm のものを選び絶縁油には長距離海底OFケーブルに適した粘度の低い合成絶縁油（ソフト型アルキルベンゼン油）を使用している。

3.3.2 試験結果

試験内容は次の2点に分かれる。

- (i) 常温と高温（負荷電流による温度勾配のある高温状態及び外部加熱による均一高温状態）での直流破壊試験を実施し、3.1.2、3.1.3に述べた発生電界や破壊強度を検討する。
- (ii) 異常電圧及び異常電圧重畳時の破壊試験により、3.1.2~3.1.3の解析結果を検討する。

直流電圧による破壊試験結果を表3.6に示す。

表3.6 試作250 kV級直流OFケーブルの
直流破壊試験結果

No.	試験条件			破壊電圧 (kV)
	加熱	導体電流(A)	シース温度(°C)	
1	常温	0	16	1150
2	外部	0	105	850
3	内部	1050	68	850

表 3.6 中の加熱方法のうち、外部加熱とはケーブル外周にヒータと保温材を巻き、所定の温度に保った状態を指し、導体加熱とは、導体に負荷電流を流し、その発熱により高温状態に保ったものを指している。

この結果、上記の苛酷な高温状態でも試作ケーブルは運転電圧の3倍以上の破壊性能を有していることがわかる。

一方、異常電圧に関する試験結果は表 3.7 に示されている。インパルス単独や交流の破壊電圧は交流ケーブルにより得られる値と同等である。インパルス重畳時の破壊電圧については 3.3.4 項で詳細に考察する。

3.3.3 直流破壊試験結果の考察

表 3.6 の結果をもとに先の (3.4)、(3.5) 式による直流ケーブル絶縁体内の電圧及び電界分布計算方法の妥当性を検討する。ただし、従来の計算方法とも比較するため、次の3種類の計算方法を採用している。

- (i) 従来の計算法 絶縁体は同じ特性の材料により均一に構成されており ($\rho_0, \alpha, \beta, k = \text{一定}$)、絶縁体の発熱を無視した場合。 ($\sigma (\text{gradV})^2 = 0$)

表 3.7 試作 250 kV 級直流ケーブルの
異常電圧破壊試験結果

No	試 験 条 件				破壊電圧 (kV)
	試 験 電 圧	導体電流 (A)	シース温度 (°C)	直流電圧 (kV)*	
4	交 流	0	16	—	420
5	⊖ インパルス	0	14	—	⊖ 1080
6	⊕ インパルス	0	17	—	⊕ 1150
7	直流と同極性インパルス	1350	50	⊖ 260	⊖ 1050
8	同 上	1350	52	⊖ 390	⊖ 1120
9	直流と逆極性インパルス	1350	54	⊖ 260	⊕ 980
10	同 上	1350	49	⊖ 520	⊕ 750
11	直 流	1350	48	—	⊖ 950
12	極 性 反 転	1350	50	—	⊕ 650*

注) *直流電圧を予め約1時間課電
*破壊せず

- (ii) 絶縁体の発熱を考慮する。 ($\sigma_0, \alpha, \beta, k = \text{一定}, \sigma (\text{gradV})^2 \neq 0$)

- (iii) (3.3)、(3.4) 式による。 ($\rho_0, \alpha, \beta, k \neq \text{一定}, \sigma (\text{gradV})^2 \neq 0$)

なお各計算法における ρ_0, α, β, k 及びその組み合わせによる段絶縁構造は表 3.8 のとおりである。

表 3.8 250 kV 直流 O F ケーブル絶縁体の固有抵抗と熱伝導率
(計算法 (i) ~ (iii) に用いられた定数)

計算法	絶縁厚 (mm)	ρ_0 ($\times 10^{19} \Omega \cdot cm$)	α ($1 / ^\circ C$)	β (mm / kV)	k ($10^2 \text{ watt} / ^\circ C \cdot cm$)
(i) (ii)	12.4	2.0	0.100	0.04	0.182
(iii)	0.7	1.97	0.104	0.042	0.200
	0.8	1.72	0.103	0.040	0.200
	1.0	1.78	0.099	0.039	0.182
	2.7	1.85	0.098	0.041	0.182
	7.2	1.89	0.098	0.041	0.182

計算結果は試験結果と合わせて表 3.9 に示されている。表 3.9 中には最高ストレスとなる部分の油浸紙材料の温度を考慮した破壊強度も併記されている。

表 3.9 250 kV 直流 O F ケーブルの破壊試験結果の解析

No.	導 体 電 流 (A)	シース 温 度 (℃)	破 壊 電 圧 (kV)	計算法	破壊時の電界と温度の計算値				材 料 の 破壊強度 (kV/mm)と 温度(℃)
					導 体 側		シ ー ス 側		
					電 界 (kV/mm)	温 度 (℃)	電 界 (kV/mm)	温 度 (℃)	
1	0	16	1,150	(i)	98.3	16	86.8	16	<u>115</u> (16℃)
				(ii)	98.3	16	86.8	16	
				(iii)	<u>105</u>	16	78.5	16	
2	0	105	850	(i)	78.2	105	63.8	105	<u>80</u> (108℃)
				(ii)	73.6	109	68.5	105	
				(iii)	<u>81.1</u>	108	58.9	105	
3	1,050	68	850	(i)	47.6	96	87.1	68	<u>83</u> (68℃)
				(ii)	38.2	101	95.4	68	
				(iii)	48.9	99	<u>86.2</u>	68	

これらの結果から以下の諸点が明らかになる。

- (i) 3 種の計算方法から求めたケーブルの計算破壊強度の差は 10 kV/mm 以内であり、計算時の諸定数 (表 3.8) の誤差を考慮すると、この差のみにより、計算方法の優

劣は比較できない。ただし、材料の破壊強度と最もよく一致するのは(Ⅲ)の計算法である。

- (ii) 試験 № 2 でケーブルが破壊し、課電々圧による $[\sigma(\text{grad V})^2]$ が 0 となった条件では、ケーブルのシース温度は 2 時間後に 105°C から 100°C に低下していた。この差 5°C は絶縁体の発熱によっていたことは明らかである。すなわち、高温で高電圧を加えた場合には絶縁体発熱を無視することができず、また場合により熱不平衡による熱破壊を生ずる恐れもあるので、ケーブルの耐圧あるいは破壊試験を行なう場合に注意を要する点である。

なお、ケーブルの熱破壊現象については第 4 章でさらに検討する。

- (iii) 試験 № 3 ではシース側の温度 68°C 、電界強度 86.2 kV/mm で破壊している。実線路のケーブルでもシース側に高電界の発生するような負荷電流が流れた状態ではシース側温度は、導体側温度より $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ ほど低くなっている。油浸紙の破壊強度の温度依存性(図 3.3)を考慮すると、シース側は、電界強度に対して $15\sim 20 \text{ kV/mm}$ 程度の高い破壊強度を持つことになる。したがって直流ケーブルの特異現象であるシース側の高電界は、従来考えられていたほどには大きい問題とならないといえる。さらに後述するようにサージ重畳時や極性反転時の導体側の高ストレスを考え合わせると直流ケーブルにおいても導体側の高ストレスに対する絶縁設計に重点を置かねばならない。

- (iv) 直流電圧によるケーブル絶縁体の破壊孔は、インパルスによる本質的な電気破壊の跡と類似して、導体側からシース側へ絶縁体を垂直に貫通している。

ただし、その形状は、インパルスの場合、ストレスの高い導体側の孔径が小さく、シース側へ円錐状に広がっているのに対し、直流の場合は、計算上のストレスの高くなる側の孔径が大きく(今回の例では $10\sim 15 \text{ mm}$)しだいに小さくなり、他端で $3\sim 5 \text{ mm}$ となり逆の円錐状をしている。この現象が直流破壊孔の特徴である。

以上の検討結果から、直流ケーブルの電界分布の計算には、本論文に示したように絶縁体の発熱を考慮し、さらに段絶縁設計による各層の固有絶縁抵抗の差を加味することのできる計算方法が必要であること、及び破壊特性や耐電圧特性に関しては、破壊強度の温度依存性にもとづいて評価する必要があることが明らかとなる。

3.3.4 異常電圧破壊試験結果の考察^{37), 41)~43)}

表 3.7 の試験結果のうち、異常電圧の単独課電、すなわち、交流、インパルス破壊電圧は、予期通りの値が得られている。インパルス破壊電圧は、インパルスレベル 750 kV に対するケーブルのインパルス耐電圧試験値 900 kV (750×1.2) を越えており、設計の観点からは十分な値である。

一方、サージ重畳時の破壊電圧を、予め加えた直流電圧と重畳後の電圧ピーク値の関係で図示すると図 3.10 が得られる。

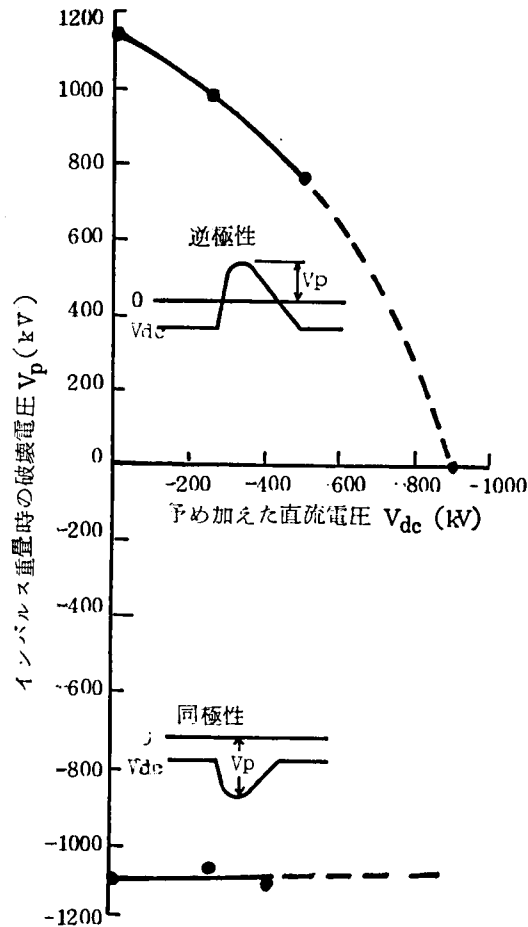
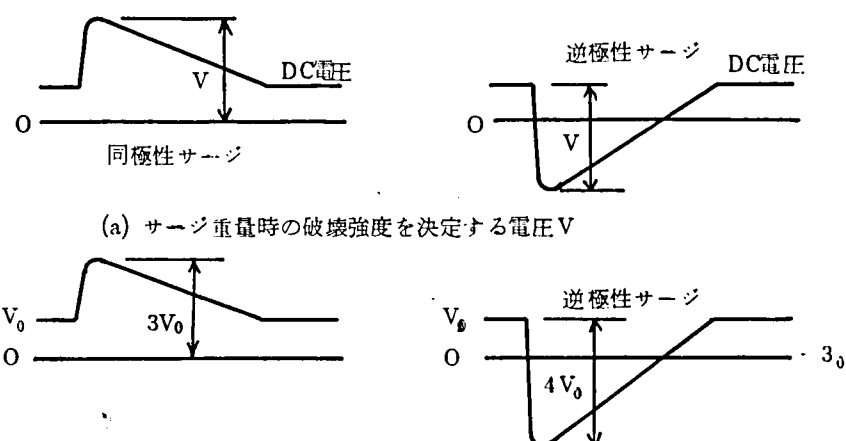


図 3.10 異常電圧重畳時の直流ケーブル破壊特性

このように、実ケーブルにおけるサージ重畳時の破壊電圧が初めて明らかになり、前項までに述べた基本的な解析結果と合わせると、直流ケーブルの設計における重要な考え方が導き出される。

3.1.5節に述べたように、直流電圧に異常電圧を重畳したとき、同極性サージが重畳されるか、逆極性サージが重畳されるかによって、油浸紙層と油層という微視的な構造に対しては異なった現象で破壊が生じている。しかし、油浸紙と油層を一体とみなした巨視的な見方からすると重畳時の破壊強度は、ほぼ 110～120 kV で一致する。

これを、ケーブルに加わる電圧という点から見直すと図 3.11(a)の模型図に示された状態となる。



(b) ギャップなどで保護されたケーブルに生ずるサージ重畳現象

- (a) 同極性サージに対してはピーク値が、逆極性サージに対しては変化分が破壊を決定する。
- (b) 対地電圧 $3V_0$ のサージが加わったとき同極性ならピーク値 $3V_0$ が、逆極性なら変化分 $4V_0$ が破壊と結びつく。(a), (b) から逆極性サージ重畳時のほうが過酷であることがわかる。

図 3.1.1 直流ケーブルにおけるサージ重畳

すなわち、同極性サージ重畳時には重畳後の電圧ピーク値が、ある値以上となれば破壊を生じ、また逆極性サージ重畳時には、重畳後のピーク電圧ではなく、そのときの電圧変化が、ある値以上となれば破壊を生じる。この電圧を巨視的な意味での電界強度に換算したとき、その値が $110 \sim 120 \text{ kV/mm}$ となる。

しかし、実際のケーブル系統では、アレスタやギャップ等の保護装置が取り付けられており、これらは一般に気中放電を利用しているので空間電荷の影響がなく、対地電圧がある設定レベルを超えたときに動作する特性を持っている。今、この保護レベルが直流運転電圧 V_0 の3倍の $3V_0$ であるとする、同極性あるいは逆極性のサージが進入したときの電圧は図 3.1.1 (b) のようになる。

図 3.1.1 の (a), (b) を対比すると、ケーブルの耐えるべき電圧は、同極性の場合には $3V_0$ であるのに対し、逆極性の場合には電圧の変化分 $4V_0$ に相当する。従って、ケーブルの絶縁性能の点からは逆極性サージの重畳が最も苛酷となる。

本研究で試作したケーブルの性能は、図 3.1.0 に示したように、運転電圧 250 kV の場合の逆極性破壊電圧が約 980 kV であり、仮に系統の保護レベルが 750 kV であれば、電圧変化分が $1,000 \text{ kV}$ となるため逆極性異常電圧の侵入に対してはケーブルは耐え得ない。したがって直流ケーブルの性能を確認するためのインパルス試験電圧として、単に系統の基準絶縁強度に対応した値、例えば 900 kV (基準絶縁強度 $\times 1.2$) よりも、(運転直流電圧) + (系統の保護レベル) に対応した値、例えば 1200

kV $((250+750) \times 1.2)$ などを採用すべきである。

しかし、この例に見るように、直流 250 kV 用ケーブルとして 1200 kV のインパルス耐電圧を要求すると、その絶縁厚は少くとも 18 mm 以上を必要とし、直流ケーブルの経済的な設計が不可能となる。これを防ぐには、系統の保護レベルを低く押さえないといけない。現在の直流 OF ケーブルの運転時の設計電界は、 $30 \sim 35 \text{ kV/mm}$ であり、直流破壊強度の約 $1/3$ に相当している。また、図 3.2 に示したように、直流破壊強度とインパルス破壊強度はほぼ同程度であるから、系統の保護レベルを運転電圧の 2 倍程度に押えれば、ケーブルは逆極性重畳を考慮した系統のサージに耐えることができ、最も経済的なケーブル設計が可能となる。

なお、前述したように、極性反転現象も逆極性サージの重畳と等価であり、その試験結果は先の表 3.7 に示されている。 $\pm 375 \text{ kV}$ で 50 回及び $\pm 650 \text{ kV}$ で 10 回の反転に耐えており、ケーブル自体で破壊するまでに至っていない。 $\pm 650 \text{ kV}$ の極性反転は、電圧変化分として $1,300 \text{ kV}$ に相当する。この値はインパルス単独の場合や、逆極性インパルス重畳時に比較して高くなっている。これは実験時に極性反転を機械的に行っており、 $1/10$ 秒オーダーの時間を経て極性が変化するため、3.1.5 項に述べた空間電荷の逃げが多くなるためであると考えられる。

3.3.5 同径接続部の性能^{33), 34)}

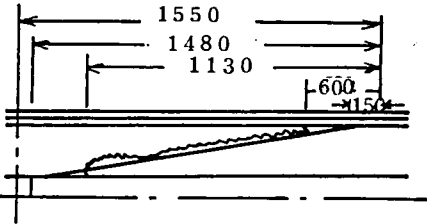
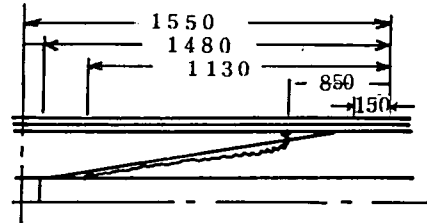
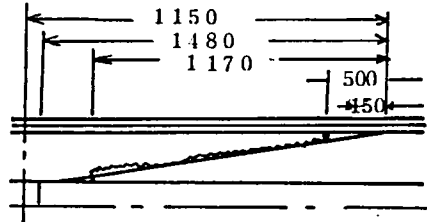
本論文では、ケーブル本体を対象としており、ケーブル接続部の性能に関しては詳細には述べていない。しかし、直流ケーブル用同径接続部については直流絶縁固有の問題があり、これを解明した結果を本節にまとめておく。

同径接続部とは文字通り、ケーブルと同じ外径の接続部である。ケーブルの単長は製造設備及び輸送重量によって制限されるため長尺の海底ケーブルでは単長ケーブルを接続する必要がある。陸上のケーブルでは補強絶縁を施した接続部が使用されるが海底ケーブルでは鉄線鎧装後の可撓性を維持するため、接続部の外径は極力ケーブル外径に合わせる必要がある。

絶縁体部分を主体に、その内部構造を示したものが図 3.12 である。

ケーブル絶縁体はテーパ状に長く整形され、そこにケーブルと同一の油浸紙が同じ絶縁体厚さまで巻かれる。作業には精密さと時間を必要とするため、作業雰囲気によって絶縁体は吸湿する。絶縁体形成後、鉛管が被せられ真空乾燥されるが、作業中の吸湿を完全に除去することはむずかしい。同径接続部を試作し、作業条件と絶縁耐力との関連を明確にしておく必要がある。試作接続部の作業条件、試験結果及び絶縁破壊状況をまとめたものが表 3.10 である。

表 3.10 試作 250 kV 直流 OF ケーブル同径ジョイントの試験結果

№	作 業 条 件	課 電 方 法 破 壊 電 圧	破 壊 路	油 浸 紙 の 水 分 量 (%)
1	屋内開放状態で組立 気温 12～18℃ 湿度 50～70% 数層毎に 80～90℃ のかけ油 作業時間 8(h)×2.5(日)	600 kV (30 min) 後 50 kV (30 min) で昇圧 850 kV 7 min B.D 試験温度 15℃		ケーブル本体部: 0.12 ペンシリング部: 1.10 巻き戻し部: 1.25
2	屋内開放状態で組立 気温 16～26℃ 湿度 80～92% 各層毎に 80～90℃ のかけ油 作業時間 8(h)×3(日)	500 kV 較正後 600 kV への昇圧中 B.D 試験温度 22℃		ケーブル本体部: 0.14 ペンシリング部: 1.85 巻き戻し部: 0.89
3	屋内開放状態で組立 気温 22～29℃ 湿度 90～95% 各層毎に 110～120℃ のかけ油 作業時間 8(h)×2.5(日)	750 kV (60 min) O.K 試験温度 28℃ 750 kV (30 min) 後 50 kV (30 min) で昇圧 900 kV (22 min) B.D 試験温度 80℃		ケーブル本体部: 0.14 ペンシリング部: 0.55 巻き戻し部: 0.60

(注) 8時間作業終了後仮注油して翌日まで放置

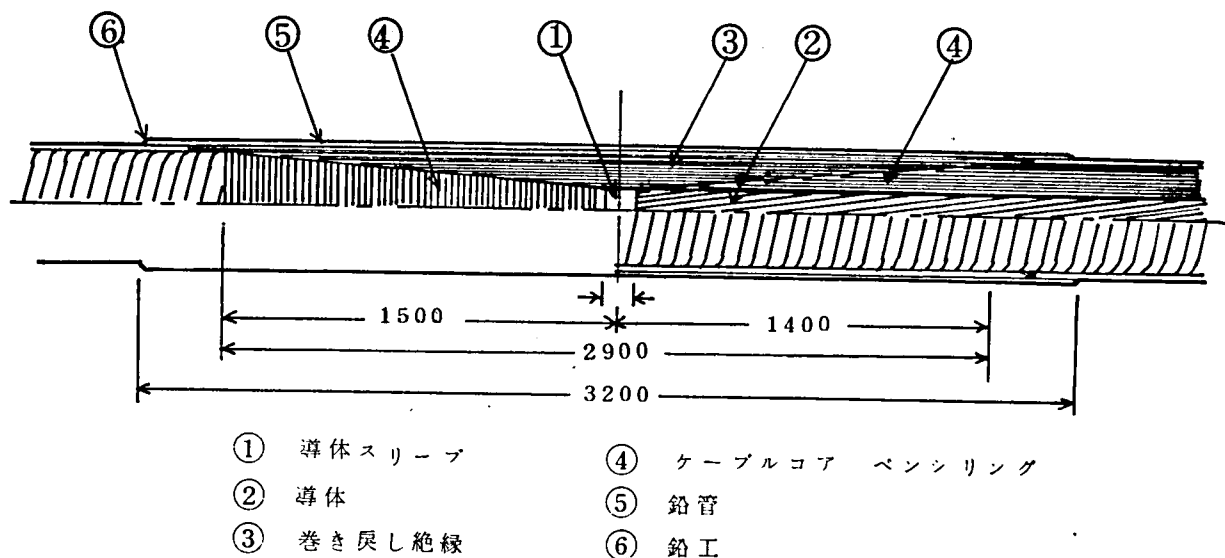


図 3.1 2 試作 250KV 1×400mm² 直流 OF ケーブル同径ジョイント

油浸紙中の残留水分が、直流固有絶縁抵抗や破壊強度に強く影響することは 3.1.3 節に示した通りであるが、同径接続部の性能も作業雰囲気と水分により大きく左右されることが明らかになる。

一例として巻戻し部の油浸紙の水分量が、0.5%程度で、その絶縁抵抗特性が $\rho_0 = 1.0 \times 10^{19}$, $\alpha = 0.11$, $\beta = 0.044$ である場合の接続部内の等電位分布及び電界強度を求めてみる。

計算手法としては、対象領域を格子状に分割し、各格子点で電流連続の方程式を立て、各点の電位を求める差分法を採用する。ただし、接続部の絶縁厚はケーブル部の鉛被厚 3mm 分だけ厚いものとしている。等電位分布は図 3.1 3 となり、予想されたように絶縁抵抗の低い巻戻し部の電圧分担は小さくなるが、他の部分の電圧分担が増していることがわかる。とくに、ケーブルコアのテーパ部の先端（ベンシリリング部）では運転中の電界が 38 kV/mm にも達し、ケーブル部の導体上最大電界 24 kV/mm をはるかに越えている。仮に同一電界強度で破壊するとしても接続部の破壊電圧はケーブル部の 2/3 以下に落ち、吸湿による破壊強度の低下を加味するとさらに低い電圧で破壊する。表 3.10 の結果もこれを裏づけており、電界強度の高いベンシリリング先端が破壊し、その後破壊強度の低いテーパ部に沿ってシース側に達する破壊路となっている。

250 kV 運転時、負荷電流 600 A

$$\begin{aligned} \text{ケーブル絶縁体} & \begin{cases} \sigma_0 = 0.50 \times 10^{-19} & (1/\Omega \cdot \text{cm}) \\ \alpha = 0.10 & (1/^\circ\text{C}) \\ \beta = 0.040 & (\text{mm/kV}) \end{cases} \\ \text{巻戻し部絶縁体} & \begin{cases} \sigma_0 = 1.0 \times 10^{-19} & (1/\Omega \cdot \text{cm}) \\ \alpha = 0.11 & (1/^\circ\text{C}) \\ \beta = 0.044 & (\text{mm/kV}) \end{cases} \end{aligned}$$

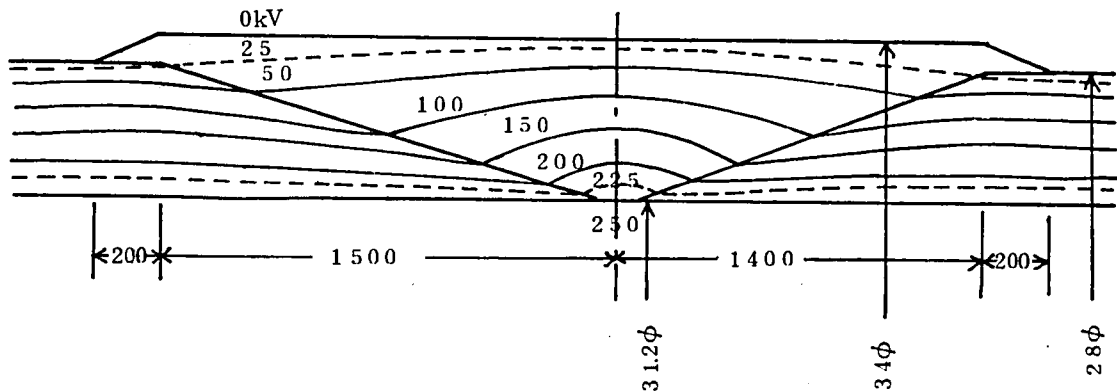


図 3.1.3 同径ジョイント部の等電位分布

これらのことから、直流ケーブルの接続部の施工時には吸湿と汚れを防止することが絶縁性能上非常に重要であると云える。

なお、他のケーブルを用いた追加検討の結果、低湿度雰囲気中で短時間に組み立てさらに新たに考案した手法により加熱状態で真空乾燥すれば、接続部の残留水分を0.1%程度に押え、電気性能もケーブルと同等以上となし得ることを確認している。

3.3.6 ま と め

直流送電用ケーブルは世界にもその実績は少く、我国に於ては基礎検討がなされたのみであった。このため直流 UHV OF ケーブルの開発に当っては材料の検討と詳細な理論解析とともに小サイズ 250 kV 級ケーブルによる実験的追求が必要であった。一連の検討により、以下に述べる新たな事実を明らかにし、OF ケーブルが UHV 直流ケーブルとして採用し得ることを認めるに至った。得られた成果は以下のとおりである。

(i) 直流ケーブルの絶縁設計の基本となる絶縁体中の電界分布について、

- ① 印加電圧による絶縁体中の発生熱を考慮した電界分布計算手法を導いた。
- ② 直流ケーブルに於ても段絶縁設計が必要であることを認識し、これについても設計可能な計算手法を開発した。

- ③ 油浸紙層と油隙層の特性の差による微視的空間電荷を考慮して、異常電圧重畳時の各部電界計算手法を得た。
- (ii) 熱刺激電流測定手法を用い、OFケーブル絶縁体中に蓄積される空間電荷が油隙部のイオン分極電荷によるものであることを明らかにした。
 - (iii) 油浸紙の直流絶縁耐力は、温度、吸湿量により極めて大きい影響を受け、絶縁設計時にはこの点を十分考慮する必要があることを明らかにした。
 - (iv) 直流250kV級ケーブルにおいて、その絶縁耐力を確認するとともに、直流、異常電圧重畳等に対する電界分布が上記理論計算値と一致することを明らかにした。
 - (v) 実線路に於ける異常電圧に対して、ケーブルの絶縁設計は、直流電圧にそれとは逆極性のサージが重畳した場合を重視して実施すべきであることを提案した。
 - (vi) 長尺海底直流ケーブルに不可欠となる同径接続部について、作業中の汚損と吸湿を防止することが最も重要であることを確認し、具体的な防止対策を確立した。
- 以上のように、直流ケーブルに関する技術的問題点に関し、新たな理論的、実験的研究を行ない、直流OFケーブルの総合的な絶縁設計方法を確立した。この結果をベースとして、次節に述べるように、500kV級直流OFケーブルの開発を開始した。

3.4 500 kV 直流OFケーブルの絶縁性能

北海道一本州連系用250 kV直流OFケーブル系統建設の具体的計画が昭和46年に発表され、昭和55年には、わが国初の250 kV級直流ケーブル系統が運転された。

また、将来の遠隔地大容量原子力発電所から都市部への送電系統として、交流UHV(1000 kV級)あるいは直流UHV(1000 kV級±500 kV)が選ばれようとしている。

このような直流送電方式の実用化計画に対応して、500 kV直流OFケーブルを開発しておく必要がある。

筆者はこの開発研究に於て、前章に述べた基礎的研究成果を活用するとともに、数回にわたる試作と試験を実施し、十分な絶縁性能を持つ500 kV直流OFケーブルと接続部を開発したものである。^{43), 44)}

3.4.1 500 kV 直流OFケーブルの目標性能と構造

500 kV 直流OFケーブルによる目標送電能力は1回線(2条)当り1,000 MW以上である。

500 kV級架空直流送電系統は米国等の一部で建設されているが、ケーブルの開発例は皆無である。このため系統電圧、異常電圧、試験電圧の検討自体が一つの研究課題となる。詳細な決定過程は後述するが、本研究では次の電圧値を設定する。

送電々圧 : 線間1,000 kV

対地±500 kV

系統BIL : 1250 kV(運転電圧の2.5倍)

これら設定電圧に対応した試験電圧は表3.11にまとめたとおりであり、CIGRE推奨案に基づく形式試験については3.4.4項に述べる。

表 3.11 ±500 kV OFケーブルの試験電圧

試験項目 \ 電圧ほか	試 験 電 圧	そ の 他 条 件
わ く 耐 電 圧	直 流 600kV-10 min	常 温
試 料 耐 電 圧	直 流 1000kV- 1 h	常 温 及 び 高 温 (1000A以上通電80℃)
インパルス耐電圧	インパルス 1500 kV-3回	常 温
CIGRE推奨案 にもとづく長時間 耐電圧	直 流 ⊕1000 kV-10日 ⊖1000 kV-10日 ⊕ 750 kV-10日	1日1回ヒートサイクル (1000A以上通電85℃以上) 4時間毎に極性反転

一方、送電容量面では、交流ケーブルの場合のように送電電圧と独立に決定することはできない。すなわち、負荷電流によって絶縁体内の電界分布が変化し、最大電界強度も変化するためである。そこで、目標値として1000MW、電流値に換算して1000Aを選びこれが許容されるか否かを開発過程において明らかにすることとする。

3.4.2 ケーブルの構造

前述のように直流ケーブルの絶縁体に加わる電氣的ストレスは電圧と温度条件によって大きく変化する。このため直流ケーブルの設計に当っては熱的設計と電氣的設計を平行して実施する必要がある。

(1) 導 体

苛酷な布設条件の下で負荷電流1000Aを許容できる導体サイズは約 1000mm^2 となる。この電流は直流電流であるため表皮効果による電気抵抗の増加を考慮する必要はない。一方、海底ケーブル用として欠くことのできない同径接続部に於ては導体の接続法により性能が左右される場合があり、導体接続は、交流大サイズケーブルで用いられた6分割圧縮形状よりも同心撚り構造の方が容易である。このような理由から導体構造は、同心円形より線を採用する。

なお、油通路は長尺線路にも適用し得るよう $16\text{mm}\phi$ を選んでいる。

(2) 絶縁体厚さ

これまでの直流OFケーブルに関する検討結果から直流運転電圧に対しては 35kV/mm 、インパルスに対しては 100kV/mm の電界強度が許容できることが判明している。

運転電圧と異常電圧の関連は、系統構成や避雷器その他の保護装置により決定されるものであり、既設の 250kV 級直流ケーブル系統では運転電圧の3倍程度の異常電圧レベルが採用されている。しかし、将来の 500kV 級直流系統が実現される頃には、直流系統の異常電圧保護装置の発達と内部異常電圧の抑制により、異常電圧レベルを2.5倍程度にまで押えられると期待される。そこで今回の 500kV 直流ケーブルの開発にあたっては異常電圧は運転電圧の2.5倍、すなわち 1250kV を選んでいる。

これにより、所要絶縁厚は 21mm となり、後述するように直流、インパルスいずれに対しても平衡のとれた絶縁設計を行なうことができる。

なお、異常電圧レベルを3倍の 1500kV とすると、許容電界 100kV/mm に対し絶縁厚を約 30mm としなければならず、このとき直流運転時の電界は約 23kV/mm となる。すなわち直流運転電圧に対する裕度が大きく、直流ケーブルの経済的な利点が失われることになる。

さらに追記すれば、系統の異常電圧レベルを 1250kV にすることは、3.3.4項に

示した考え方からすると、系統の保護レベルを750 kVにすることに相当し、このような能力を持つ保護装置が開発されて初めて経済的な500 kV直流ケーブルが得られることになる。

なお、金属シースの材質には鉛を選んでいるが、これは海底ケーブルを対象としたとき、海水に対する耐腐蝕性の点でアルミより鉛の方が秀れているためである。

同様の理由で、防蝕層にはポリエチレンを用いている。

以上のように設計されたケーブルの構造は表3.12及び図3.14に示すとおりである。

表3.12 500 kV $1 \times 1,000 \text{ mm}^2$ 直流 OF ケーブルの構造

項 目		単 位	数 値
油 通 路 内 径		mm ϕ	16.0
導 体	断 面 積	mm ²	1,000
	形 状	—	中空円形より線
	外 径	mm ϕ	45.0
絶 縁 体 厚 さ*		mm	21.0
遮 蔽 層 厚 さ		mm	0.3
鉛 被 厚 さ		mm	4.5
防 蝕 層 厚 さ		mm	5.0
ケ ー ブ ル 外 径		mm ϕ	110.0
最 大 静 電 容 量		$\mu\text{F}/\text{km}$	0.304
最 小 絶 縁 抵 抗		M Ω -km	2,300
最 大 導 体 抵 抗 (20°C)		Ω/km	0.0184

注：*絶縁体厚さは導体上カーボン紙厚さおよび絶縁体上カーボン紙厚さ（各0.3 mm）を含む。

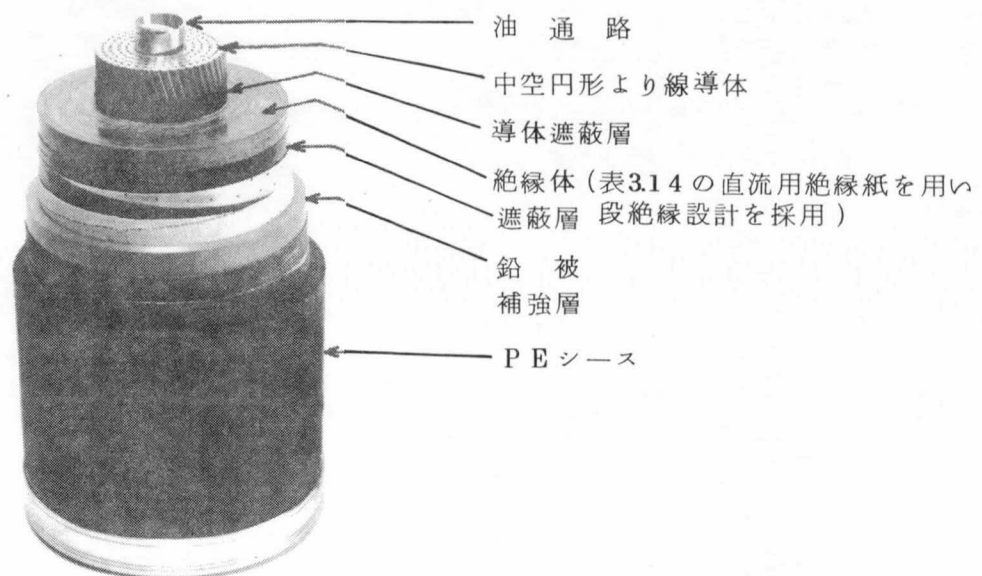


図3.14 500 kV $1 \times 1,000 \text{ mm}^2$ 直流OFケーブル

3.4.3 500 kV 直流OFケーブルの絶縁設計^{43), 44)}

表3.12の構造のケーブル絶縁体に発生する電界を求めてみる。電界分布は図3.8に類似したものとなり、各電圧に対する導体側及びシース側の電界強度は表3.13のとおりとなる。ただし、このとき絶縁体は均一な特性であり、

比誘電率： $\epsilon = 4.0$

固有絶縁抵抗： $\rho = \rho_0 \exp[-\alpha T - \beta E]$

$$\rho_0 = 2.0 \times 10^{19} \Omega \cdot \text{cm}$$

$$\alpha = 0.10 \quad 1/^\circ\text{C}$$

$$\beta = 0.04 \quad \text{mm/kV}$$

であるとする。

表 3.13 各種条件下における絶縁体内の電界強度

電 圧 (kV)	電 流 (A)	導体側電界強度 (kV/mm)	シース側電界強度 (kV/mm)
直 流 運 転 時 500	0	28.8	20.9
直 流 運 転 時 "	1,000	20.3	28.4
直流常温耐圧時 1,250	0	67.8	56.4
直流高温耐圧時 1,000	1,225*	36.4	59.4
インパルス 1,250	0	84.5	43.6
インパルス 1,500	0	101.3	52.3

注：* 絶縁体内の温度こう配が、1000A通電時の1.5倍となる電流である。

表3.13 から明らかなように、直流耐電圧試験あるいはインパルス耐電圧試験時の電界は一般の油浸紙の破壊電界強度に近く、裕度は小さい。このため材料の選択とケーブル製造工程に慎重な検討が必要となる。

(1) 絶 縁 材 料

3.3節の検討結果とその後追加された諸試験によれば、直流ケーブル用絶縁紙には、直流及びインパルス破壊強度が極めて高いものであることと同時に苛酷な取り扱いを受ける海底ケーブルとして十分な機械的強度を持つことが要求される。幸い超高压交流ケーブルのような低損失化をはかる必要がないため、絶縁紙の高密度、高気密度化により、この要求に対処することができる。ただしこれら絶縁紙の低損失化自体は必要ではないが、油浸状態での固有絶縁抵抗が高く、且つ安定していることが望ましい。このため交流ケーブル用絶縁紙と同じく脱イオン水洗により不純物が除去されている。

得られた絶縁紙の特性は、従来の交流ケーブル用低損失紙と比較して表 3.14 に示されている。

また、絶縁油には長期の安定性という点から超高圧OFケーブルとして多くの実績を持つ合成絶縁油を採用している。

(2) 絶縁体の構成

第1次試作ケーブルでは、表3.14の絶縁紙の開発前に交流絶縁紙を何種類か使用し、段絶縁構成の効果、及び材料の特性のケーブル絶縁性能に及ぼす影響を検討する。使用した絶縁紙の概略の特性は表3.15に示すとおりで、試作ケーブルの絶縁体構成は次の4通りである。

Aケーブル： 密度の高い①～③を使用し、最外層には絶縁耐力の高い薄紙①を配置。

Bケーブル： 絶縁抵抗の高い④～⑥を使用。最外層には薄紙の④を配置。

表 3.1 4 直 流 用 絶 縁 紙 の 諸 特 性

分 類	厚 さ (μm)	密 度 (g/cm^3)	気 密 度 ($\text{s}/1,00\text{ cc}$)	破 壊 強 度 (kV/mm)		比誘電率	誘電正接 100℃(%)	絶 縁 抵 抗		
				直 流 (常温)	インパルス (常温)			$\rho_a(\Omega\cdot\text{cm})$	$\alpha(1/^\circ\text{C})$	$\beta(\text{mm}/\text{kV})$
交流用 低損失紙	125	0.72	1,300	138	127	3.4	0.21	19.5×10^{11}	0.10	0.043
今回開発した 直流用絶縁紙	80	1.04	9,000	160	150	4.2	0.32	6.6×10^{11}	"	0.044
	100	1.00	4,500	145	135	4.1	0.33	6.3×10^{11}	"	0.043
	125	1.02	4,000	"	130	4.0	"	6.0×10^{11}	"	0.045
	150	1.06	3,000	140	"	"	0.32	5.0×10^{11}	"	"

注：破壊強度より右は合成油含浸紙の特性を示す。

表 3.1 5 第 1 次 試 作 ケーブル に 使 用 し た 絶 縁 紙 の 特 性

項目 種類No	厚さ (μm)	$\rho_b (\times 10^{19} \Omega\cdot\text{cm})$	$\alpha (1/^\circ\text{C})$	$\beta (\text{mm}/\text{kV})$	ϵ'
①	80	1.16	0.104	0.042	4.3
②	125	0.99	0.103	0.040	3.6
③	150	0.91	0.103	0.038	3.4
④	100	1.79	0.099	0.039	3.6
⑤	125	1.95	0.098	0.048	3.4
⑥	150	1.85	0.098	0.041	3.3

Cケーブル： Bケーブルと同じく④～⑥を使用。最外層には④の替りに厚紙の⑥を配置。

Dケーブル： 均一絶縁として⑤のみで構成。

これらの試作ケーブルを用いた直流、並びにインパルス電圧による破壊試験の結果明らかになった点は以下の通りである。

- (i) A～Dケーブルとも常温での性能は良好であるが、高温の直流破壊電圧が予想外に低く、1,000 kVの耐压試験に対する裕度がない。
- (ii) Aケーブルでは、最外層に使用した絶縁紙①の機械的強度の不足のため、直流電圧に対して本来の破壊強度が発揮できず、予測値の80%程度の性能である。
- (iii) B、Cケーブルでは最外層の絶縁紙④、⑥の特性がそのまま性能として得られており、上記(ii)項と対比すると、シース側の高ストレスに対し、とくに薄紙による破壊強度の向上をはかる必要はなく、かえって薄紙は機械的強度の不足のため、紙切れや紙しわを生じ絶縁性能の低下を惹き起こすと云える。
- (iv) Dケーブルは均一絶縁設計されており、インパルス、直流破壊電圧ともに段絶縁設計のB、Cケーブルより低い破壊電圧となっている。すなわち、直流ケーブルの場合にも段絶縁設計の効果が期待できる。

第1次試作の結果をまとめると、直流ケーブルの絶縁体構成には、段絶縁が有効である。しかし、電氣的ストレスのみに注目し、機械的特性を無視した段絶縁設計はかえって性能の低下につながることを、高温での直流破壊特性を向上させるには、油浸紙の直流破壊強度をさらに高くする必要があること、の2点が明らかになる。

この結果をもとに、先の表3.14の直流O・Fケーブル用絶縁紙が選ばれ、これを用いた段絶縁設計が施されている。

4種の絶縁紙で段絶縁構成した場合の電界分布の計算結果を図3.15に示す。図中の材料の破壊強度と比較すると、各試験電圧には余裕を持って耐え得ると期待できる。

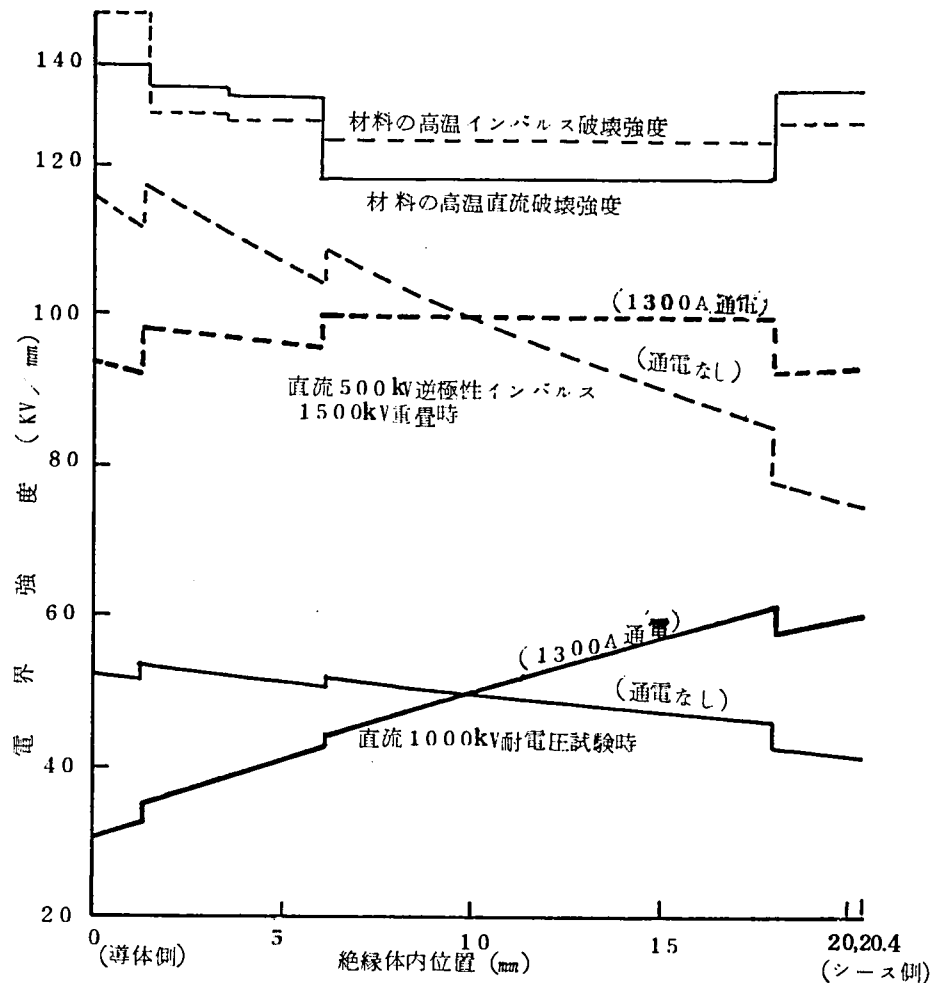


図 3.15 500 kV 直流 OF ケーブル絶縁体内電界分布

3.4.4 500 kV 直流 OF ケーブルの絶縁性能^{43), 44), 45)}

第 1 次試作ケーブルの結果を活かして、新しい絶縁紙の開発と製造条件、とくに新しい絶縁紙に見合った紙巻き工程、乾燥含浸工程上の製造条件の改良を実施し、500 kV OF ケーブルが製造された。

(1) わく試験

製造ケーブル全長に対するわく試験結果をまとめると表 3.16 となる。設計の考え方がデータに表われており、超高压交流ケーブルと比較すると、誘電率と誘電正接がかなり大きくなっている。

(2) 試料試験

上記設計によるケーブルは所要の耐電圧性能を有すると考えられるが、これまでの開発結果や設計の趣旨がケーブルとして発揮されていることを検討するため、インパ

ルス及び直流電圧による破壊試験を実施し、その主な結果が破壊電圧、温度条件、破壊時電界強度とともに表3.17にまとめられている。

高温状態の破壊試験では絶縁体の発熱による熱破壊を生じたと推定されるものもある。直流ケーブルの熱破壊については4章で考察する。

インパルス、直流いずれの電圧に対しても破壊強度は高く、材料の特性に近い値が得られている。

表 3.16 ±500 kVOF ケーブルのわく試験結果

項 目	試 験 結 果
静 電 容 量 ($\mu\text{F}/\text{km}$)	0.303
誘 電 正 接 (%)	0.311 (AC200kV, 16°C)
絶 縁 抵 抗 ($\text{M}\Omega\text{-km}$)	43,000 (20°C)
直流導体抵抗 (Ω/km)	0.0184 (20°C)
直流耐電圧 ($\text{kV} \cdot \text{min}$)	600 kV 10 min

表 3.17 ±500 kVOF ケーブルの試料試験結果

試験項目	導体電流 (A)	温 度 (°C)		耐電圧または 破壊電圧 (kV)	耐電圧または破壊時の 最高電界と温度
		導 体	防蝕層 表 面		
インパルス	0	19	19	1740 破壊	導 体 側 120 kV/mm (12°C)
	1300	85	58	1520 良	導 体 側 103 kV/mm (85°C)
直 流	0	24	24	1650 以上	導 体 側 88.1 kV/mm 以上 (24°C)
	1400	※ 85	60	1350 良	シース側 82.1 kV/mm (63.8°C)
	1300	※ 89	62	1350 破壊	シース側 83.4 kV/mm (64.6°C)
直流ヒート	1300 (8 h ON 4 h OFF)	93	60	1200 良 (12 h)	シース側 76.7 kV/mm (63.9°C)
サイクル耐圧	1300 (8 h ON 4 h OFF)	※ 89	62	1350 良 (12 h)	シース側 83.4 kV/mm (64.6°C)

注) ※ 理論計算上は熱破壊領域となる。詳細は4章に示す。

(3) C I G R E 推奨案に基づく耐電圧試験

直流ケーブルの性能を確認するための試験規格は未設定であるが、C I G R E (国際大電力送電網会議)により長時間耐電圧試験が推奨されている。⁴⁶⁾

C I G R E 推奨案の概要は表3.18に示すとおりであり、約30日間にわたり、苛酷な耐電圧試験を実施するものである。

表3.18 C I G R E 推奨案による直流ケーブル耐電圧試験

ステップ	試験内容	印加電圧	期 間	その他条件
1	機 械 試 験	—	—	必要な曲げ試験等を実施
2	耐 電 圧 試 験	\oplus 2 V _{DC} \ominus 2 V _{DC} \oplus 1.5 V _{DC} (V _{DC} =500 kV)	10日 10日 10日 (反転回数60回)	通電々流は設計電流以上。 8時間通電、16時間遮断 最高導体温度は設計値+5℃ 極性反転は4時間毎
3	最終性能確認	インパルス	—	所定のインパルス耐電圧試験

今回の試験では、ケーブル50mと後述の接続部1組及び気中終端部2組を組み立て、

導体通電々流： 1,200~1,300A

導体最高温度： 85℃以上

を条件として、直流耐電圧試験を行なう。

気中終端部用碍管が試験用のものであり、その漏洩距離が所要長の約半分であること、屋外試験のため、かなり強い汚損を受けること、等のため数回の気中閃絡を生じたが、ケーブル本体、接続部等は全く異常なく全試験を終了している。課電時間の累計は表3.19のとおりである。

表3.19 500 kV 直流 O F ケーブルの耐電圧試験結果

課電々圧 (kV)	課 電 時 間 (h)
+ 1,000	303 (12日以上)
- 1,000	282 (11日以上)
± 750	287 (11日以上) 反転回数74回

絶縁特性の推移を見るため誘電正接も測定されたが、全期間を通して変化なく安定した値が保たれている。⁴⁷⁾

直流耐電圧試験終了後、インパルス耐電圧試験を実施し、常温 1500kV に耐えられることが確認されている。

さらに、前節に述べたように、直流に逆極性インパルスが重畳した場合の性能が直流ケーブルにとって重要であることから次の条件で重畳破壊試験を行なった。

直流電圧： \ominus 600 kV 3 時間課電

インパルス電圧： \oplus 1,000 kV / 3 回から約 50 kV / 3 回のステップで昇圧

その結果、インパルス 1350 kV の破壊値が得られ、この結果は目標性能を上まわるものである。

3.4.5 接続部の構造と絶縁性能^{43), 44), 45)}

(1) 直線接続部

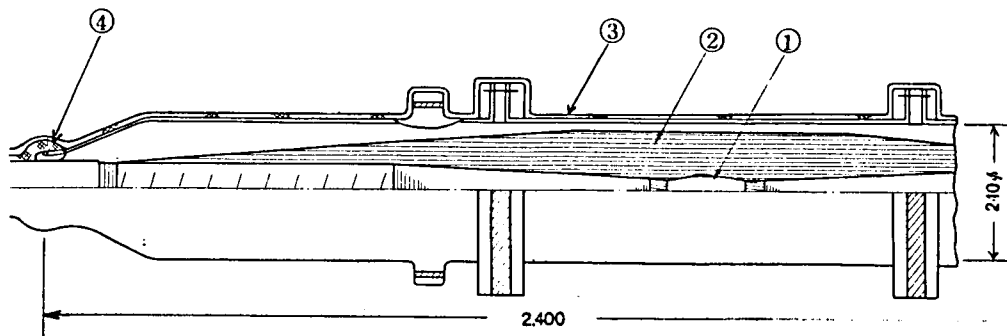
ケーブル本体と同様、直流ケーブル用接続部は交流ケーブル用接続部とは異なる考えの絶縁設計を行なう必要があるが、設計データの蓄積が少なかったため、接続部のモデルや小サイズケーブルの接続部を試作し、予備検討を行ない以下の結果を得ている。

すなわち、接続部用油浸紙の貫通方向の直流破壊強度は、ほぼインパルスと同等の値となり、ケーブル絶縁体と変る所はない。しかし油浸紙沿層方向の破壊強度は、電極間距離が長いと交流破壊強度（実効値）に近い特性となる。

また、250 kV 直流ケーブル用接続部の研究で明らかにしたように、接続部の残留水分と汚れが性能に大きく影響する。

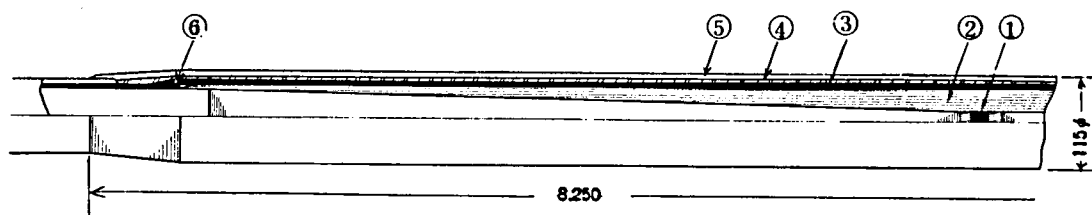
これらの点を考慮して、接続部組立中の吸湿と汚れの混入を極力防止できるよう作業方法に改善をはかるとともに、絶縁設計上、接続部の半径方向寸法は交流 275 kV OF ケーブルと同程度とし、また、長さ方向はこれより約 40 % 大きくすることにより、貫通、沿層方向の破壊強度の差に対処している。

普通接続部の構造は図 3.16(a) に、また電気性能は表 3.20 に示すとおりである。絶縁性能はケーブルとほぼ同等である。



(a) 500 kV 直流 OF ケーブル用普通接続部

- ① 導体接続管
- ② 補強油浸紙
- ③ 接続箱本体
- ④ 鉛 工



(b) 500 kV 直流 OF ケーブル用同径接続部

- ① 導体接続管
- ② 補強油浸紙
- ③ 鉛スリーブ
- ④ 補 強 層
- ⑤ 防 蝕 層
- ⑥ 鉛 溶 接 部

図 3.16 500 kV 直流 OF ケーブル用普通および同径接続部

注：(a)は普通接続部を示し、275KVAC ケーブル用接続部と比較して外径は同等、長さは約 1.4 倍である。また(b)は同径接続部を示すもので可とう性を持たせるため外径はケーブルとほぼ等しい。ただし、長さを増して所定の絶縁耐力を持たせてある。

表 3.20 500kV 直流 OF ケーブル 普通接続部および
同径接続部の試験結果

ジョイント	№	試験電圧	加熱法および 導体電流(A)	ジョイント 表面温度(℃)	破壊(耐圧) 電圧(kV)	破壊点
普通接続部	1	インパルス*	加熱なし	8	1,730	ジョイント
	2	"	1,300	50	1,500良	—
	3	直 流	"	53	1,250良	—
同径接続部	1	インパルス	加熱なし	12	1,700良	—
	2	"	1,300	52	1,500良	—
	3	直 流	"	49	1,350良	—
	4	"	*** ヒートサイクル	"	"	—

なお、接続部においても負荷電流による温度勾配が生じ外部遮蔽層側に最大電界が発生するので、遮蔽層側のわずかな乱れにより絶縁破壊を生ずることがないように組立には十分な注意が必要である。

(2) 同径接続部

数回にわたる試作により決定された同径接続部の構造は図3.16(b)のとおりであり、その性能は表3.20に併記されている。

250kV 級ケーブルの同径接続部では、作業中に100℃内外の絶縁油をそそぐことにより、ある程度の吸湿を除去することができた。(表3.10参照)しかし、絶縁厚と長さが約2倍の500kV ケーブルの接続部では、このような一時的な処理ではなく低湿度の雰囲気中で組立て、吸湿量自体を少なくする必要がある。図3.17はその一例として接続部の絶縁体内の残留水分量が組立時の周囲条件により大きく影響されることを示すものである。残留水分量の多い№1試料は900kV 課電中に漏れ電流が急増したため、課電不可能となり、絶縁破壊と判定したものであり、4章に述べる熱破壊の一つと考えられる。試料№2は低湿度中で組立てられたもので、残留水分はケーブル部と大差なく、絶縁性能も十分な値となっている。

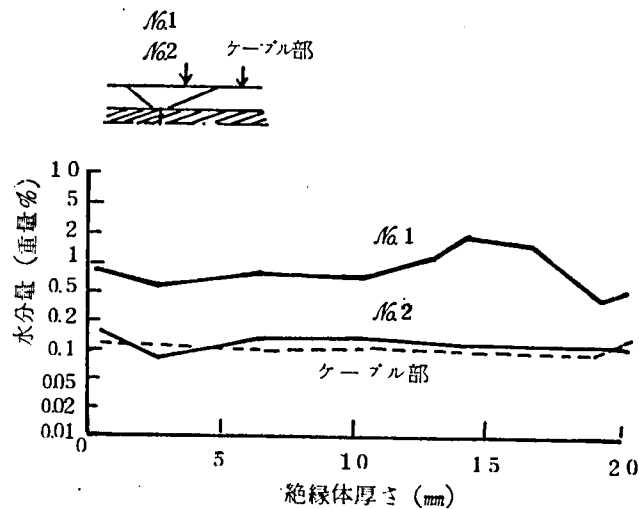


図 3.17 同径接続部の油浸紙の残留水分量

注：No.1＝普通雰囲気中（28℃湿度80％）
8時間×3日で組み立て、高温直流900kV
破壊
No.2＝低温度雰囲気中（26℃湿度35％）
24時間連続で組み立て、高温直流1200
kVヒートサイクル（8時間ON-2時間OFF）
2回良

(3) 気中終端接続部

試験用終端接続部として、設計原理自体は交流ケーブル用と同じコーン形コンデンサ分圧方式を採用している。直流電圧のみに対しては、表面漏洩低抗分による自然分圧を利用した遮蔽形方式で十分であるが、異常電圧や極性反転に対しては抵抗成分のみの分圧では十分な絶縁耐力を得ることができない。

このため、極性反転や異常電圧に対してはコンデンサー分圧により、また直流電圧に対しては抵抗分圧となるコンデンサ形端末を開発した。終端接続部の破壊性能としては、直流、常温の条件で1650kVで破壊したものが唯一のデータで、他のすべての試験電圧に耐えている。また、他のケーブルを用いた試験により、終端接続部自体はインパルス単独課電に対して2,000kV以上の実績を持つことが確認されており、これはBIL（1250kV）の1.6倍に相当する。

3.4.6 長期課電通電試験と最終性能確認試験 (48), (49)

上記のように開発されたケーブルと接続部を用いて全長約200mの試験線路を組み立て長期課電通電試験により、本ケーブルが実線路と同等以上の苛酷な条件下で、長期間安定

した性能を持つことを明らかにする。この目的に沿って、試験線路には過電圧と過電流が長期間加わることになるが、試験条件の主なものは以下のとおりである。

印 加 電 圧 : $\pm 550 \sim \pm 650 \text{ kV}$

(運転電圧の 1.1 倍～1.3 倍)

導 体 電 流 : $1,100 \sim 1,200 \text{ A}$ 8 時間通電、16 時間遮断

(試験装置の便宜上交流電流を通電、設計電流の 1.1～1.2 倍)

導体最高温度 : 90°C

(実線路許容温度を 10°C 超過)

長期試験は約 2 年間実施され、その間の課電、通電の実績は表 3.2.1 のとおりである。

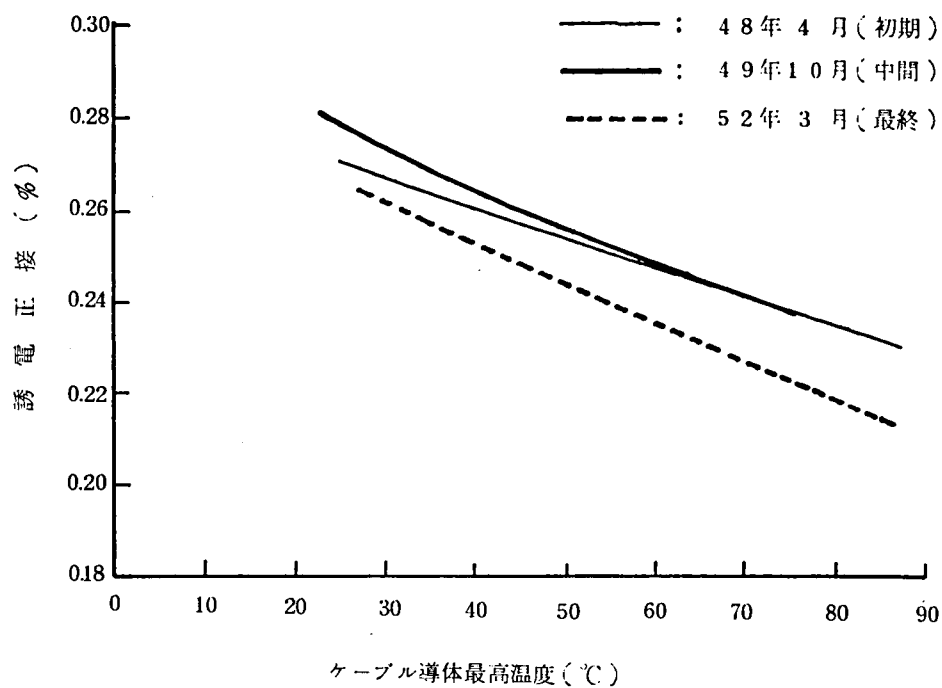
表 3.2.1 長期課電通電試験の試験条件

項 目 課電電圧 (kV)	課 電 時 間 (h)	ヒートサイクルの 回 数	極 性 反 転 の 回 数
+500	33	0	—
-500	112	2	—
+550	451	24	—
-550	580	28	—
± 550	181	10	50
+600	2613	119	—
-600	2672	124	—
± 600	1581	75	392
+650	780	31	—
-650	777	31	—
± 650	846	40	203

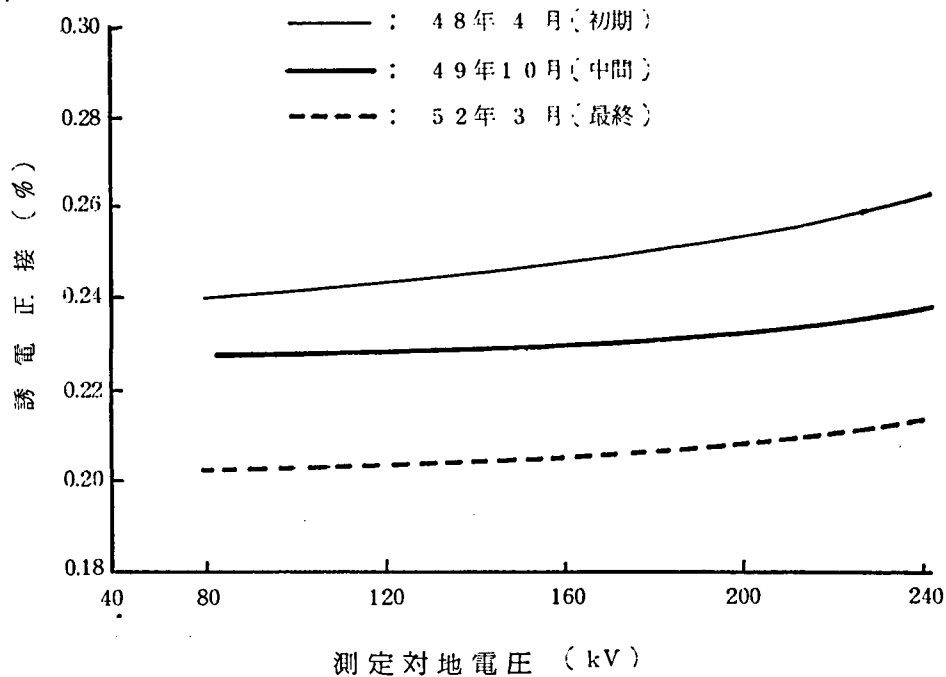
終端箱において、急激な汚損のため数回外部閃絡を生じた以外は、全長が厳しい試験条件に耐え、良好な絶縁性能が維持されている。

絶縁体の特性の一つとしてケーブル部の誘電正接を測定しており、その結果が図 3.18 である。測定時期の温度分布の相違により多少のばらつきが見られるが、誘電正接値は、試験の経過とともに減少する傾向にあり、劣化の傾向は見られない。

長期試験後のケーブルを撤去し、工場に於ける諸試験により最終性能を確認した。ケーブル破壊試験の主なものが初期の性能と対比して表 3.2.2 に示されている。⁴⁹⁾



a) 誘電正接の温度依存性



b) 誘電正接の電圧依存性

図 3.18 500 kV 直流 OF ケーブル 長期試験中の誘電正接特性

表 3.2 2 500 kV 直流 OF ケーブルの初期並に長期試験後の絶縁耐力

試料 \ 項目	№	試験電圧	導体温度 (℃) [導体通電々流 (A)]	耐電圧或いは破壊電圧 (kV)
初期試料	1	インパルス	室温 (15)	-1,700 (耐圧良)
	2	直 流	89 [1300]	-1,350 (耐圧良)
長期試験 後の試料	1	インパルス	室温 (22)	-1,650 (接続部破壊)
	2	インパルス	室温 (20)	-1,800 (ケーブル破壊)
	3	直 流	85 [1300]	-1,300 (耐圧良)
	4	直 流 に インパルス重畳	85 [1300]	直流-600 にインパルス 対地1350重畳 (ケーブル破壊)
CIGRE推奨案 による耐電圧試験 後の試料	1	直 流 に インパルス重畳	室温 (26)	直流-600 にインパルス 対地1350重畳 (ケーブル破壊)

インパルス重畳試験では、DCO 600 kV を 2 時間以上印加した後、インパルス電圧を重畳後のピーク値が、⊕ 1,200 kV となるよう調整して印加し、その後約 50 kV ずつ昇圧し各々 3 回印加した。

初期試験と最終試験の結果を比較すると、ほぼ同レベルにあるといえる。

これらの破壊試験の後、ケーブルや接続部を詳細に解体調査したが、全く異常は認められていない。

なお、ケーブルと同径接続部の残留水分量や半径方向の誘電正接値の分布 (r. p. f.) には極くわずかな変化が見られる。

表 3.2 3 はその代表値を示したものである。

表 3.2 3 絶縁体から採取した油浸紙の誘電正接及び残留水分量

試料 \ 項目 時期		油 浸 紙 の 誘 電 正 接 (%)		残 留 水 分 量 (wt%)	
		長期試験前	長期試験後	長期試験前	長期試験後
ケーブル絶縁体		0.24~0.28	0.23~0.27	0.08~0.12	0.09~0.12
同 径 接続部	補 強 層	0.30~0.35	0.28~0.30	0.15~0.19	0.15~0.17
	ケーブル ベンシリング部	0.26~0.29	0.28~0.30	0.12~0.16	0.15~0.17

ケーブル部では、水分量、 r 、 p 、 f 、ともに初期値と最終値でほとんど差が生じていないのに対し、同径接続部に於ては、初期には水分量、 r 、 p 、 f 、ともベンシリング部（補強絶縁層部を形成しやすくするため、ケーブル絶縁体を鉛筆の先端状に整形した箇所）と補強絶縁層部でわずかな差を生じていた。すなわち、低湿度雰囲気中で短時間に組み立て、加熱真空乾燥しても、手巻きした補強絶縁部の水分量や r 、 p 、 f 、は多少大きくなる。しかし長期試験後には、この差が消失している。これは初期の残留水分の偏った分布が、長期試験中のヒートサイクルにより絶縁体中に一様に拡散されるためであると考えられる。このような水分量の一様拡散は、接続部の電位分布の変歪を緩和するので、直流ケーブルの安定した特性にとって好ましい現象である。

3.4.7 500 kV 直流 OF ケーブルの絶縁性能の考察

一般的な考え方として、絶縁物の直流絶縁耐力は、交流絶縁耐力よりはるかに高く、このためケーブルにおいても500 kV級交流ケーブルが完成されれば、500 kV直流ケーブルは、絶縁厚を薄くし、容易に開発できるものと考えられていた。

しかし、直流 OF ケーブルの開発を行なってみると前節に述べたように、直流絶縁として多くの特異な問題の存在することが明確となり、交流ケーブルとは別個に直流ケーブル自体を基本から考えねばならないことが認識される。

その原因の大部分は、直流ケーブルの電界分布が絶縁抵抗によって定まり、しかもその絶縁抵抗が、温度、電界、水分、汚れによって極端に変化することと、空間電荷が蓄積しこれが電界分布を歪めることの2点にある。

したがって、対象送電圧が高くなり、これに応じて絶縁厚を厚くすることにより、平均的な電界を一定に保っても部分的な集中電界が生じ、これがケーブルの絶縁性能を決定する傾向にある。

本論文では、OF ケーブルを対象としており、OF ケーブルの電界分布は、本章に述べたように巨視的な空間電荷を無視することができるため、かなりの精度で理論解析できる。しかし、プラスチック絶縁ケーブルを直流ケーブルとして採用しようとするとき、巨視的な空間電荷が蓄積され、絶縁体内の電界を大きく歪める。このため、空間電荷そのものを明らかにしないと電界分布を知ることができない。プラスチック絶縁、とくにポリエチレン絶縁直流ケーブルの空間電荷については筆者を含め各方面で検討されている⁵⁰が、まだ十分な結論は得られていない。これが解明された段階では、OF ケーブルの空間電荷についても新たな見直しが必要と思われるが、ここでは、OF ケーブルの空間電荷は油浸紙と油隙構造による微視的のもののみが存在するとして、直流絶縁性能を考察する。

(1) 絶縁体内の電界分布

直流OFケーブル絶縁体内の電界は、固有絶縁抵抗の温度と電界依存性を考慮して理論計算することができる。ただし、超高圧直流ケーブルの場合には3.1.2で導いたように、絶縁体の発熱を含めた解析が必要である。500kV直流OFケーブルの場合もこの考え方で電界分布や破壊強度を検討し、材料の特性と対比させてケーブルの絶縁性能を評価することができる。

(2) 絶縁耐力

最終的に開発された500kVOFケーブルは、十分な破壊電圧を有しており、また長期にわたる苛酷な耐電圧試験にも問題なく耐えている。

しかし、開発経過を振り返ると種々の理論的検討とともに、油浸紙材料自体の改良により、超高圧直流OFケーブル専用の絶縁紙を採用したことがこの成功につながったと云えよう。これを含めて、超高圧直流ケーブルの絶縁性能の向上のために必要な事項を整理すると以下のとおりとなる。

- (i) 高密度、高気密度の絶縁紙を使用し、材料自体の直流及びインパルス破壊強度を高める。
- (ii) 絶縁体の発熱を考慮した電界分布の計算を行ない、発生する電界を正確に把握する。
- (iii) 前節にも述べたように、絶縁耐力の点で最も問題となるのは、逆極性サージ重畳現象である。これに対処して、単に直流電界のみでなく、サージ重畳時の電界を対象として段絶縁構成をとる。
- (iv) これら直流、サージ重畳に対して絶縁体の構成を検討するとともに、ケーブルの機械特性をも考慮して材料の特性、配置を決定する。すなわち、負荷電流の流れた場合の最外層の最大電界のみに着目して段絶縁構成を決定すると、サージ重畳時や苛酷な布設時の取扱いを受けた場合には、かえって性能の低下に結びつく危険がある。

なお、今回の開発にあたっては、系統の異常電圧レベルを1250kVとした。最終性能の確認で、直流600kVに逆極性異常電圧を重畳した場合、破壊は1350kVで生じており、充分の裕度を持っていると云える。異常電圧レベル1250kVが、将来の保護装置の改良によっても達せられず、現状の延長として異常電圧レベルが1500kV(500kV×3)となれば、今回の絶縁層21mmでは不足し、約30mmの絶縁厚を要することになる。したがって、今後の直流送電系統の系統構成、保護装置の推移によっては、改めて500kVOFケーブルの絶縁性能を評価し直す必要がある。しかしその場合でも今回得られた成果を活用すれば、比較的容易に改良を成し得るであろう。

(3) 接続部の絶縁性能

500 kV 直流 OF ケーブル用接続部の開発を通して得られた成果のうち、最も重要なものは次の 2 点である。

- (i) 直流絶縁性能は、水分と汚れにより極端に低下する。したがって接続部の組立てにあたっては、吸湿と汚損防止に細心の注意を払わねばならない。
- (ii) 接続部においても最外層に最大電界を生ずる。したがって、交流ケーブルの場合以上に外部遮蔽層の構造が重要となり、また組立て技術も要求される。

なお、終端接続部については、汚損時の外部閃絡の問題が重要である。諸外国の 250 kV 級直流ケーブルにおいても終端接続部の構造、とくに碍管寸法については経験によって決定される要素が多い。我国でも北海道一本州連系々統においては、碍管長を 6 m とすることで外部絶縁設計されており、その妥当性についてはかなりの年月の実績を見た上で評価しなければならない。500 kV ケーブル系統の実現までに、これら実績を踏まえて引き続き検討を要する。

3.5 ま と め

直流送電系統建設の具体化に対処して超高圧直流 OF ケーブルの開発を実施した。

将来への応用を考え、目標を 500 kV OF ケーブルによる 1000 MW とした。直流ケーブル自体がまだ世界的に見ても使用実績が少く、このため、材料の検討、諸現象の究明等基本的な事柄から取りあげる必要があった。前述のように、250 kV 直流 OF ケーブルを用いて絶縁性能上の問題点とその解決策を研究し、これをベースとして 500 kV 直流 OF ケーブルを開発した。

このケーブルは絶縁厚の増加にともない、直流ケーブル固有の問題が一層顕著に絶縁性能に影響し、多くの改良を要したが、最終的には目標性能を持つ 500 kV 1×1000 mm² OF ケーブルを得ることができた。得られた成果の主要点は次のとおりである。

- (1) 直流 OF ケーブル用絶縁紙は、交流ケーブル用絶縁紙以上に、非常に高い絶縁耐力を持つ必要のあることを見出し、さらに安定した絶縁抵抗と高い機械的強度を勘案し高密度、高気密度の直流 OF ケーブル専用の絶縁紙を開発した。
- (2) 熱刺激電流測定手法を用い、OF ケーブル絶縁体中に蓄積される空間電荷が油隙部のイオン分極電荷によるものであることを明らかにした。
- (3) 直流運転電圧と異常電圧の両者に対し、最適電界分布となる段絶縁設計手法を導きこれにより直流 OF ケーブルの設計手法を確立した。
- (4) 直流 250 kV 級ケーブルにおいて、その絶縁耐力を確認するとともに、直流、異常電圧量等に対する電界分布が上記理論計算値と一致することを明らかにした。

- (5) 実線路に於ける異常電圧に対して、ケーブルの絶縁設計は、直流電圧にそれとは逆極性のサージが重畳した場合を重視して実施すべきであることを提案した。
- (6) 500 kV 直流送電による1000 MW／回線の送電容量を目標として500 kV 1×1000 mm² OFケーブルを試作し、上記段絶縁設計手法が有効なこと、及びその適用に当っては絶縁紙の機械的強度も考慮する必要があることを見出した。
- (7) 最終的に製造した500 kV OFケーブルの絶縁性能を、直流、異常電圧、異常電圧重畳の各点から確認し、いずれも所期の性能を有することを明らかにした。
- (8) CIGRE推奨案にもとづく耐電圧試験及び長期課電通電試験を実施し500 kV 直流OFケーブルが実用ケーブルとして十分安定した性能を有することを実証した。
- (9) 直流OFケーブル用接続部については、交流ケーブルの場合と異なり、絶縁層外部の遮蔽層側に高電界が発生すること、作業時の吸湿が絶縁性能に大きく影響することに対応して、その構造を設計し、組立作業条件を確立した。

500 kV 直流ケーブルは相間電圧が1000 kV のいわゆるUHV送電に対応するケーブルである。その実現はかなり将来のこととなろうが、すでに一部諸外国では検討が開始され、本章の結果は高い評価を得つつある。また、国内に於ては、わが国初の直流送電系統である北海道本州連系に250 kV 直流OFケーブルが採用され、その設計製造に当っては本開発研究の成果が活用されている。

第4章 電力ケーブルの熱破壊現象

超高圧大容量送電用ケーブルの発生熱量は、送電々圧の上昇に伴う誘電体損や、負荷電流による導体損等の増加により大きなものとなっている。これに対し、2章に述べたようにこれら発熱量を考慮して許容電流が定められているが、常時の発熱量が多いため、わずかな熱条件の変化により許容温度を越え、これが原因となって絶縁体の劣化あるいは絶縁破壊を生ずる危険が増してきている。したがって送電系統の基幹となる超高圧ケーブルの信頼性を高めるには、ケーブルの電氣的絶縁破壊以外に熱を原因とした破壊現象についても十分検討しておく必要がある。

このような観点から、本章においては熱破壊の基本方程式をケーブルに適用し、直接解いて理論的に熱破壊条件を求めるとともに、各種のケーブルを高温状態で破壊させ、実験的に熱破壊現象を検討する。

現実の運転条件から見て、交流ケーブルに於ては多条布設時の運転中の熱破壊の危険が懸念されるため、ここでは詳細な検討を行ない、その結果をまとめている。直流ケーブルに関しては、当面は多条布設による熱破壊は予想されず、直流ケーブルに義務づけられた高温耐電圧試験の試験条件に多少問題があるため、その場合の試験条件と熱破壊の関連について考察している。

4.1 電力ケーブルの熱破壊理論の基本方程式とその解法^{51), 52)}

熱的な原因による絶縁破壊現象については、すでに多くの研究が行なわれ、その理論も1930年代に確立されている。^{53), 54), 55)} その基本は絶縁体に電圧が加えられた場合、絶縁体内で発生する熱量が絶縁体外へ放散する熱量よりも多くなれば、内部に蓄えられる熱量が累積的に増加し、熱的な平衡を保てなくなり、急激な温度上昇を生じ絶縁破壊に至るというものである。

一般にその条件は次式によって表わされる。

$$W \geq H \quad (4.1)$$

$$\partial W / \partial T \geq \partial H / \partial T \quad (4.2)$$

ここに、W：発生熱量 H：放散熱量である。

熱破壊の臨界条件は、(4.1)、(4.2)式を解けば求められる。しかし、後述のように(4.1)式のみからもその条件を求めることができるので、以下では(4.1)式のみを扱うこととする。まず、直流ケーブル絶縁体にこれを適用するときWとHは各々次式のとおりとなる。

$$W = \sigma (\text{grad } V)^2 \quad (4.3)$$

$$H = -\text{div } k (\text{grad } T) \quad (4.4)$$

ここに、 σ 、 k 、 V 、 T は3章に定義された導電率、熱伝導度、電位、温度である。
(4.1)式を等式に置き換え、(4.3)、(4.4)式を用いると次式が成り立つ。

$$\text{div } k (\text{grad } T) + \sigma (\text{grad } V)^2 = 0 \quad (4.5)$$

これは3章の直流ケーブルの場合の絶縁体中の熱平衡式(3.3)と同一である。

一方、電位に関しても(3.1)式と同じ次式が成り立つ。

$$\text{div } \sigma (\text{grad } V) = 0 \quad (4.6)$$

直流ケーブルに於て熱平衡条件を見出すには、(4.5)、(4.6)式を用い、同軸円筒座標に置き換えることにより最終的には(3.4)、(3.5)式の連立方程式が導かれるので、これを3章と同一手法で解くことが可能である。しかし、交流ケーブルの場合には、上式の導電率 σ の所が複素誘電率で表わされる。すなわち、 f を電源周波数(Hz)とすると次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \sigma &: j 2 \pi f \epsilon \\ &= j 2 \pi f (\epsilon' - j \epsilon'') \epsilon^* \\ &= j 2 \pi f \epsilon' \epsilon^* + 2 \pi f \epsilon \epsilon'' \tan \delta \end{aligned} \quad (4.7)$$

ただし、 $\epsilon = \epsilon' - j \epsilon''$: 絶縁体の複素比誘電率、 ϵ^* : 真空の誘電率 (F/m)

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' : \text{絶縁体の誘電正接}$$

電位に関する(4.6)式を円筒座標で表わし、さらに後述するように、 $\tan \delta \ll 1$ 及び $\epsilon' = \text{一定}$ を用いれば

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(2 \pi f \epsilon' r \frac{dV}{dr} \right) = 0 \quad (4.8)$$

となり、電位分布は ϵ' (容量成分)のみで定まることになり直ちに

$$V = V_0 \ln(r_0/r) / \ln(r_0/r_i) \quad (4.9)$$

が得られる。ここに、 r_i : 絶縁体内半径(cm)、 r_0 : 絶縁体外半径(cm)、 V_0 : 導体に加わる電圧(V)である。

一方、温度に関する(4.5)式は、(4.9)式を用いることにより、

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(k r \frac{dT}{dr} \right) + 2 \pi f \epsilon' \tan \delta \left\{ \frac{V_0}{r \ln(r_0/r_i)} \right\}^2 = 0 \quad (4.10)$$

となる。すなわち、交流ケーブルの場合、ある与えられた熱的な境界条件のもとで、

(4.10)式を解けばケーブル絶縁体の平衡温度が求まることになる。

なお、熱的な境界条件のうち、 $r = r_i$ すなわち導体側においては次式が成り立つ。

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_i} = W_C / (2 \pi r_i k) \quad (4.11)$$

$$W_C = I^2 R_C \left\{ 1 + 0.00393 (T_C - 20) \right\}$$

ただし、 W_C ：導体発生損失(watt/cm)， I ：導体電流(A)， R_C ：20℃における導体抵抗(Ω/cm)， T_C ：導体温度(℃)である。

また $r = r_0$ すなわち絶縁体外側においては、ケーブルシース温度、あるいは、ケーブル防蝕層や土壌の熱抵抗ならびに周囲土壌温度などが与えられる。

以上の方法で直流、交流ケーブルにおける熱平衡条件が求められるが、(4.2)式を用いることなく熱破壊条件を求め得る理由を図4.1の模式図により説明する。

あるケーブルに対し、熱破壊を発生させる外部要因となるものは、印加電圧、通電々流及び周囲熱条件である。したがって熱破壊条件を求めるには、このうち2条件を固定し、残りの1条件を変化させて、熱平衡が成り立つか否かを判定すれば良い。⁵⁾

今一例として、印加電圧と通電々流が一定で、ケーブルシース温度を変化させて熱破壊条件を求める場合の模式図が図4.1である。印加電圧と通電々流が一定であるからケーブルの発生熱量 W は温度に対し一義的に定まる。 W の温度依存性は主として絶縁体損の温度依存性に依っており、熱破壊を論ずる領域では温度とともに単調に増加する。したがって図6.1に示すようにケーブルシース温度 T_{sa} に対し、計算時の導体温度を低温側から順次 T_{C1} ， T_{C2} ，.....と仮定して行けば、熱平衡を保つ温度 T_{Ca} が求まる。

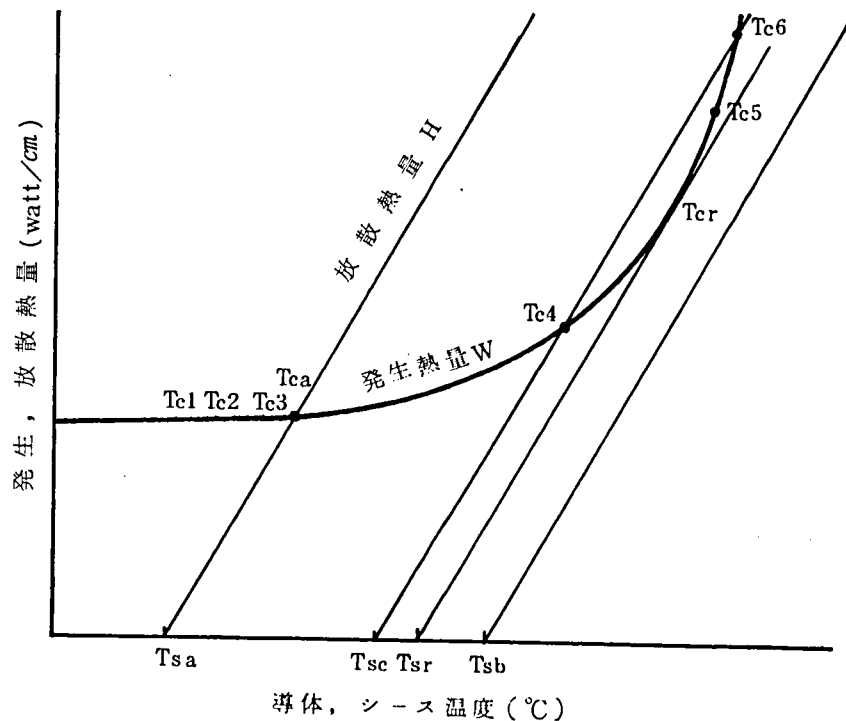


図 4.1. 熱平衡，不平衡状態の模式図

シース温度 T_{sr} までは熱平衡温度 T_{cr} を求めることができるが、 T_{sr} を越えると、 T_{cs} 、 T_{c_6} 、.....を仮定しても T_{sb} を満たす導体温度が求められなくなる。このとき、 T_{sr} が熱破壊を生ずる臨界点、すなわち熱破壊条件となる。

このような方法で熱破壊条件を求めることができるのは、発生熱量 W が温度と共に勾配を増しながら増加するためである。なお、計算時の導体温度の仮定を高温側から開始すると図 4.1 中の T_{sc} に対する T_{c_6} のように見かけの熱平衡点を求めることとなるので注意を要する。

4.2 ケーブルの誘電率及び誘電正接の特性⁵²⁾

直流ケーブルの固有絶縁抵抗の温度並びに電界依存性については、3 章で詳述した。本節では、交流ケーブルの誘電率及び誘電正接の温度と電界への依存性について述べる。

4.2.1 誘電率 ϵ

超高圧ケーブルとして実用化されている油浸紙絶縁ケーブルの誘電率は、ここで取り扱っている温度や電界の範囲では一定値とみなせる。例えば 2 章に示した 275 kV OF ケーブルで、室温 $\sim 150^{\circ}\text{C}$ 、80 kV ~ 480 kV の範囲で誘電率は、比誘電率表示で約 3.3 の一定値に保たれ高温、高電界になるとやや小さくなるが、常温、低電界との相対差は 2 % 以内であることを確認している。

4.2.2 誘電正接 $\tan\delta$

OF ケーブルの誘電正接は、印加電圧とともに多少大きくなる傾向がある。しかし、これは 2 章に述べたように遮蔽層として用いるカーボンブラック紙の特性に大きく依存し、しかも課電と加熱により電圧依存性が消滅する。したがって、運転電圧付近においては、誘電正接の電圧依存性を無視することができる。

一方、誘電正接の温度依存性は大きく、その実測結果の一例が図 4.2 に示されている。

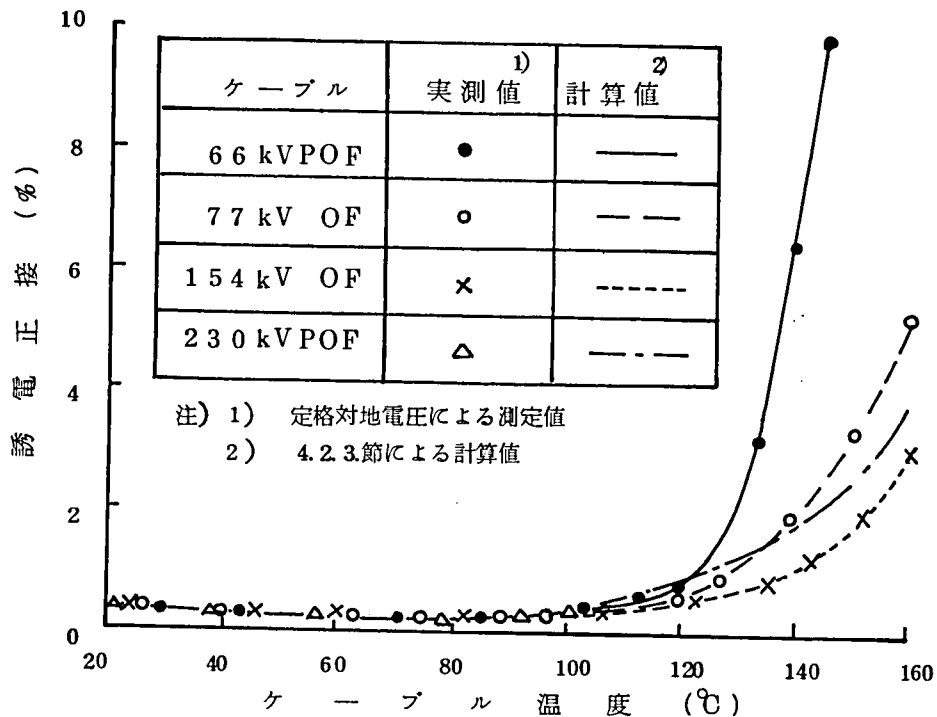


図 4.2 各種ケーブルの誘電正接の温度依存性

誘電正接の温度依存性については古くから実測とその理論づけが試みられており、熱破壊の検討に必要な高温での特性として

$$\tan \delta = a + b e^{-\theta_1 / T_k} \quad (4.12)$$

a, b, θ_1 : 定数, T_k : 温度

などの近似式が考えられている。⁵⁶⁾ ここでは室温からの特性も表わせるよう次式を導き、⁵¹⁾ これを用いている。

$$\tan \delta = A e^{-\theta_1 (1/T_k - 1/273)} + B e^{\theta_2 / T_k} \quad (4.13)$$

A, B, θ_1, θ_2 : 定数, T_k : 温度 (K)

本式が、油浸紙ケーブルの誘電正接を表わすよい近似式であることは次節に示される。

4.2.3 誘電正接の温度依存性の実測とその近似式

高温までの誘電正接の温度依存性を明確にするため表 4.1 に示す 4 種のケーブルを用いて、その実測を行なう。

表 4.1 試験に用いたケーブルの種類と構造

ケーブル種類	構造		
	導体外径 (mm)	絶縁厚 (mm)	絶縁外径
66 kV 200mm ² POF	17.0	5.5	28.0
77 kV 400mm ² OF	30.6	8.0	46.6
154 kV 600mm ² OF	36.2	12.5	61.2
230 kV 507mm ² POF	26.9	24.0	74.9

試料ケーブルはすべて苛酷な条件下で長期の課電加熱試験を実施したケーブルである。各ケーブルの公称対地電圧に於ける誘電正接の実測値は図中の各点で示されている。この実測結果を(4.13)式に対応させ、求めた定数が表4.2のA, B, θ_1 , θ_2 であり、(4.13)式は各々図4.2中の曲線で表わされる。

表 4.2 各種ケーブルの近似式のための定数と比誘電率

ケーブル種類	(4.13)式の定数				比誘電率
	A	B	θ_1	θ_2	
66 kVPOF	1.49×10^{10}	4.87×10^4	15,800	500	3.3
77 kVOF	9.50×10^8	4.65×10^4	10,920	498	3.7
154 kVOF	6.32×10^8	6.74×10^4	9,660	421	3.7
230 kVPOF	3.72×10^6	4.58×10^4	6,700	523	4.0

実測値と近似式による計算値はよく一致しており、ケーブルにより各定数は異なるものの、誘電正接の温度依存性は(4.13)式で近似できると云える。なお、230 kVPOF(パイプ型高油圧OF)ケーブルのみ、実測は100℃にとどまっており、これ以上の温度に対しては80~100℃の特性が延長されるものとして近似されている。また、表4.2中には次節の計算時に必要となる各ケーブルの比誘電率も併記している。

4.3 熱破壊条件の理論計算と実験的検討⁵¹⁾

4.3.1 熱平衡温度と熱破壊条件の計算

各ケーブルの定数及び誘電特性を用い、表4.3の電圧、電流条件により、ケーブルの熱平衡温度を求めてみる。表4.3の通電々流と印加電圧は後述の破壊試験の条件と

関連しており、印加電圧は電氣的破壊の先行を抑えるため、公称対地電圧の0.7～1.5倍の範囲となっている。また、絶縁体の熱伝導度は別途行ったケーブルの温度上昇試験結果から、 $0.00182 \text{ watt}/(^{\circ}\text{Ccm})$ となる。

表 4.3 熱平衡温度の計算条件と熱破壊条件

ケーブル種類	計 算 条 件		熱破壊時のシース温度($^{\circ}\text{C}$)	
	通電々流 (A)	印加電圧 (kV)	計算結果	試験結果
66 kVPOF	0	25.4	175	170
77 kV OF	0	66.6	164	167
				160
				162
154 kV OF	0	133	159	162
230 kVPOF	200	153	154	130

注) 試験結果については 4.3.2 節に述べる。

図 4.3 は熱平衡時のケーブルシース温度に対する導体温度の計算結果を示している。ケーブルシース温度 (OF ケーブルでは金属シースの温度、POF ケーブルでは絶縁体遮蔽層の温度) の上昇に伴って導体温度も上昇するが、温度の低い所では単にシース温度の上昇に比例しているのに対し、温度が高くなると (4.13) 式で表されるよ

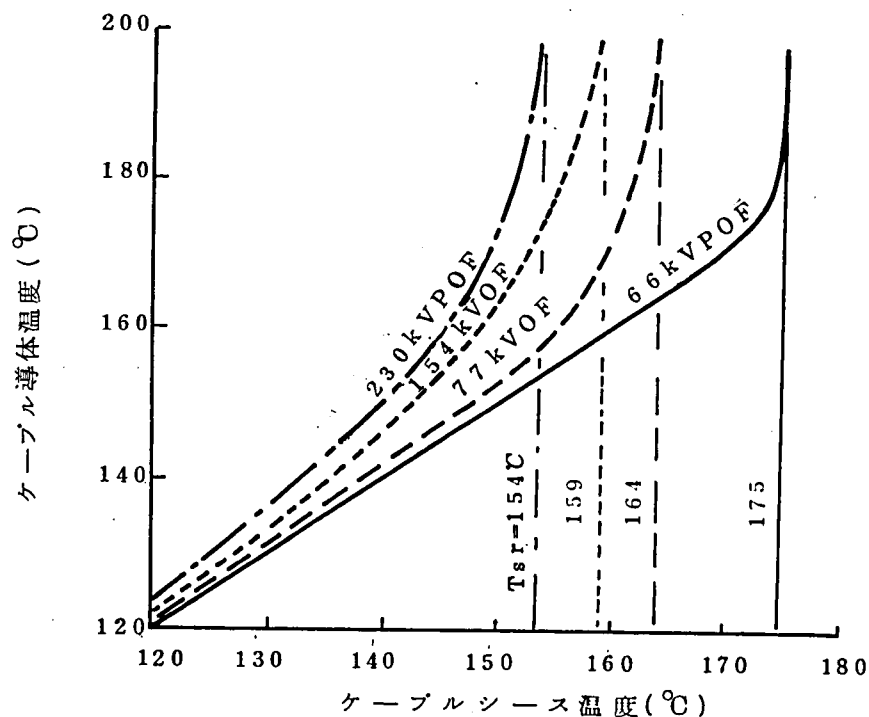


図 4.3 熱平衡時の導体温度計算結果

うな誘電体損の急増のため導体温度も急上昇し、ある温度 T_{sr} を越えるともはや熱平衡が成り立たなくなることがわかる。各ケーブルについて T_{sr} を求めたものが表 4.3 中の計算結果として示されている。なお表 4.3 中には後述の熱破壊試験の結果も併記されている。

4.3.2 熱破壊試験結果

前節の計算と対照しつつ、実験的に熱破壊の発生を確認するため、先の4種のケーブルを用いて高温下での交流破壊試験を実施した。その結果、一定の通電々流と印加電圧の下で、ケーブルシース温度を上昇させて行くと、表 4.3 に示すように計算結果に近い所で絶縁破壊すること、破壊点は熱破壊としての特徴を持つこと、破壊発生時に特異な現象が見られること等ケーブルの熱破壊現象についていくつかの新たな現象を見出した。本節ではこれらの知見について述べている。

(1) 破壊試験

課電、通電条件を表 4.3 の計算条件と同一とし、ケーブルシース温度を $120 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 付近から階段状にしないで上昇させた。その時間経過を示したものが図 4.4 であり、絶縁破壊を生じたときの温度が先の表 4.3 に記した試験結果である。

なお、先の誘電正接測定時を含めて、ケーブルの温度は周囲に発熱線と保温材を巻きつけ、発熱線の電流を変えることにより調整されている。

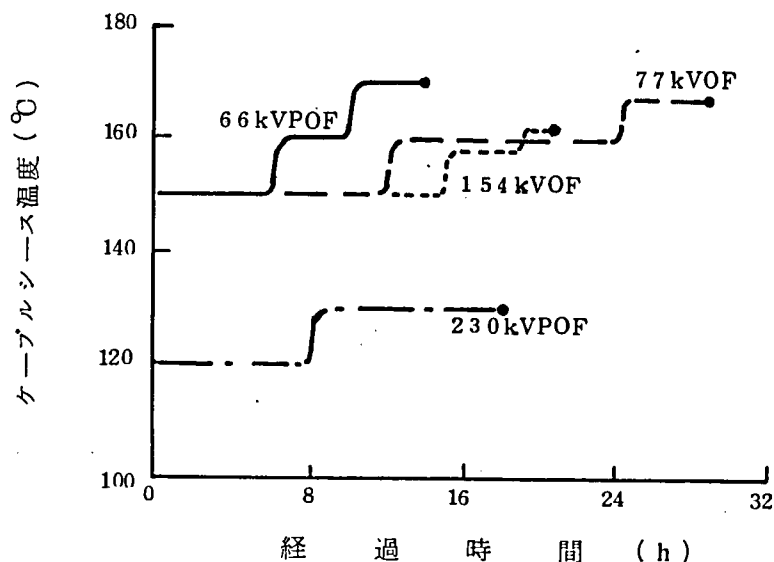


図 4.4 交流破壊試験時のケーブルシース温度
(—● : 絶縁破壊を意味する)

(2) 破壊ケーブルの解体調査

破壊後のケーブルを解体し、詳細に調査した結果を4種のケーブルに共通した現象としてまとめると次のとおりである。

(i) 絶縁体の変色 破壊孔を中心に長さ5～20 cmの範囲の絶縁体は他の部分に比べて濃褐色に変色しており、その中心に直径5～15 mmの破壊孔が導体側からシース側に向けて炭火した孔となって残っている。なお230 kVPOFケーブルの場合は破壊点の両側2 mの箇所にも同様の濃褐色の変色部分が見られる。

(ii) 絶縁体の劣化 破壊点付近の絶縁紙は著しい熱劣化を受けており、耐折強度は1,900～2,000が1,000～1,100に、また平均重合度は、1,100が900程度に低下しており、明らかに高温加熱履歴を受けている。

(iii) 導体の変色 上記の絶縁体の変色部に対応して50～100 cmにわたって銅導体に加熱変色が見られる。またPOFケーブルの場合は外周の遮蔽用銅テープにも変色が認められる。

(iv) 破壊点の異臭 個人差の影響する事柄であるが、破壊点周辺では、砂糖のこげた、あるいはむし焼きにしたような匂いがしており、一般の交流破壊点のような酸性の匂いは感じられない。

以上の観察結果から、4種のケーブルとも高温状態での課電による誘電体損の増加が、一層の温度上昇を引き起し、比較的短時間に油及び油浸紙が急激に劣化あるいは分解し、絶縁破壊に至ったものであると考えられる。ただし、次項とも関連することであるが、最終的な破壊は、完全な熱破壊というよりも、分解ガス中の放電と残存していた劣化油浸紙層の破壊という形で生じたものと思われる。

(3) 破壊時の特異現象

破壊試験中に印加電圧の変動とケーブルからのガス発生という二つの特異現象が見られたので、以下これらについて述べる。

破壊試験に於ては、一定電圧を印加した状態でケーブル温度をしだいに上昇させたが、破壊の15～30分前から印加電圧が低下する傾向を見せ、たびたび変圧器の一次側電圧を調整して発生電圧を一定に保つ必要があった。また、このとき後述の方法でケーブル内のガス量を測定したところ、かなり多量のガスが発生していることが確認された。この現象をさらに検討するため、77 kVOFケーブルを用いて追加試験を行い、以下の結果を得ている。

(i) 電圧変動 通常の破壊試験時には破壊と同時に変圧器発生電圧が急に低下するのみで、破壊の前にそれを予告するような電圧の低下は見られない。

今回の試験に用いた変圧器は図4.5の等価回路に示すように直列共振形試験用変圧器であり、共振点からのずれにより発生電圧は低下する。ケーブル内のガス発生と関連して、ケーブルの静電容量が変化すれば、このような現象が生じることが考えられる。

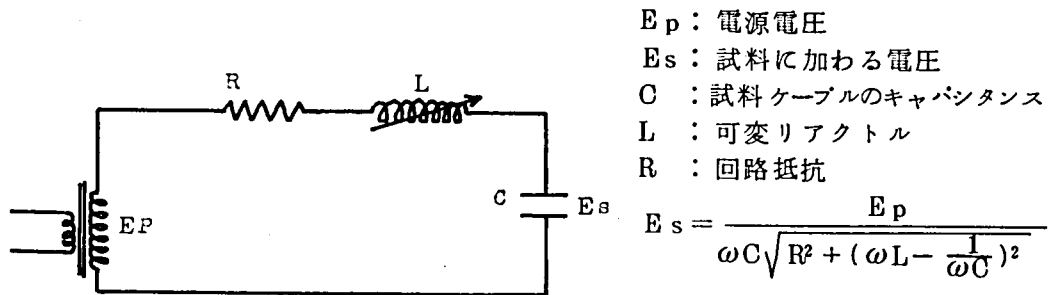


図 4.5 直列共振形試験用変圧器の等価回路

この点を確認するため、可変リアクトルのインダクタンス L を共振状態の L_{cr} より大きくした場合と小さくした場合で電圧変動を観測した。変圧器の一次電圧を一定として放置したところ、図 4.6 の結果が得られた。 $L \div 1.05 L_{cr}$ の場合は、共振からずれる方向で電圧は低下する一方であるが $L \div 0.95 L_{cr}$ の場合は

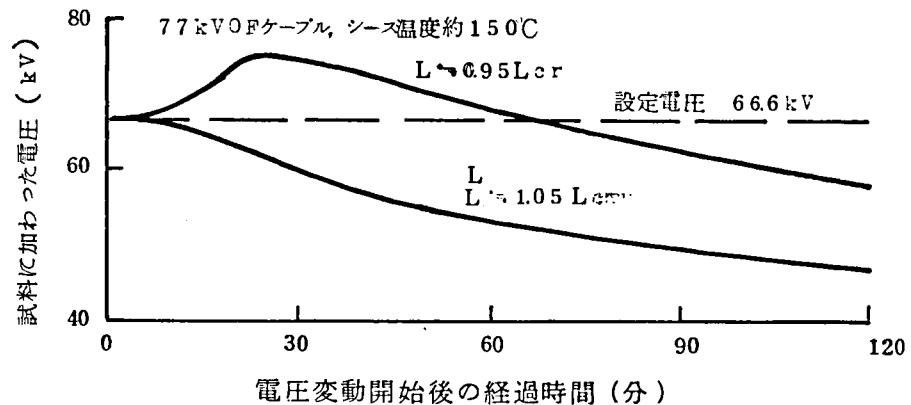


図 4.6 電源電圧を一定とした場合の試料に加わる電圧の変動

一度共振状態となり電圧が上昇し、その後低下している。このことから、今回の破壊試験では破壊前に静電容量が増加しているといえる。

なお、4.5 図の等価回路で抵抗分が増加しても電圧が低下することになるが、この場合には $L > L_{cr}$ いずれの場合にも電圧が低下することになり、図 4.6 に示すような試料に加わる電圧の一時的な上昇を説明することができない。

(ii) ケーブル内のガス発生

ケーブル中で異常加熱が生じたり、絶縁破壊が生じたときに、ケーブル中に多少のガスが発生することは広く知られている。しかし、今回の試験では破壊の前に多量のガスを発生しており、その詳細を知るため、ガス量の時間変化を測定し

た。ガス量の測定結果、課電々圧、ケーブルシース温度の変化を示したものが図4.7である。有効試料長8 mのA, B 2試料とも初期には約200 ccであったガス量が、前述の電圧変動が生じた直後には110あるいは130 ccに増加している。そして電圧を遮断するかあるいはケーブル温度を下げることによりガス量は半分以下に減少するが、再課電あるいは再温度上昇により破壊を生じる。破壊後のガス量はそれぞれ150, 115 ccに急増している。

これらの追加試験により、高温状態で交流電圧を印加すると、絶縁破壊に達する前にケーブルの静電容量が増加し、また絶縁体中に多量のガスが発生し、その後破壊に至ることが明らかとなる。すなわち、誘電体損による温度上昇の結果、部分的なガス化が生じ、ガス中の放電に移行する。このため、全絶縁厚の一部は導通状態となり、等価的に絶縁厚が減少するため静電容量が増加し、さらに発熱を助長しガスを発生させる。ガス中放電の領域は次第に増加し、絶縁破壊に至るものと考えられる。

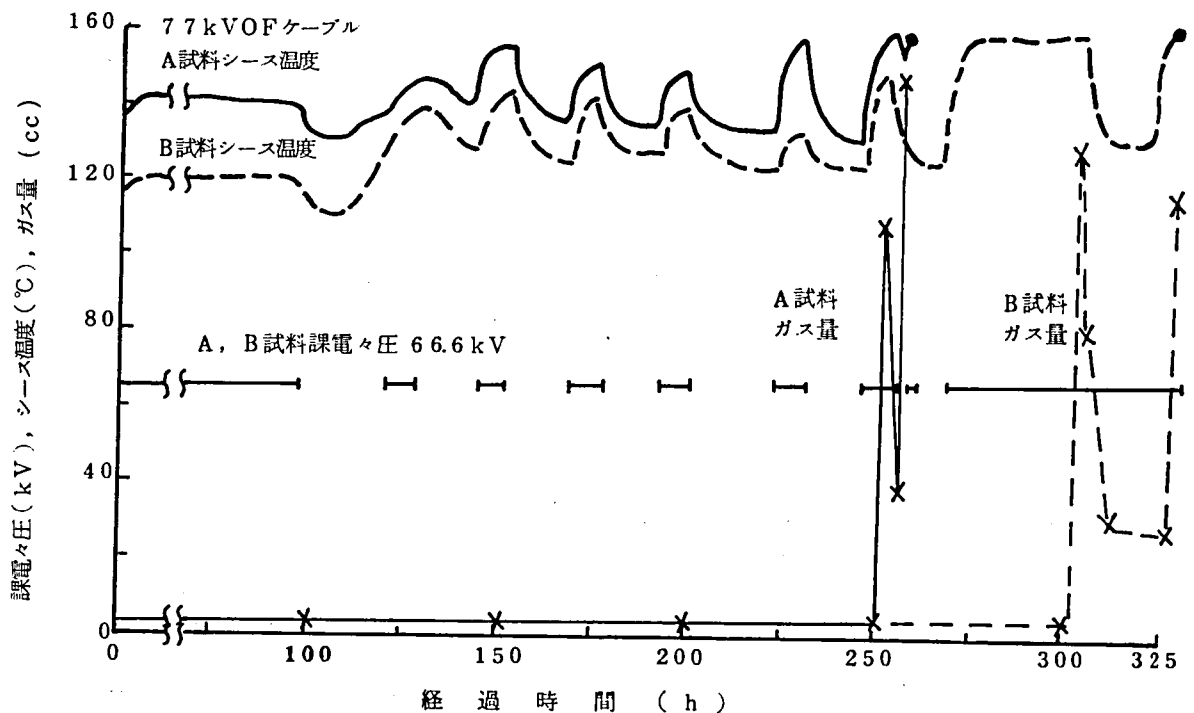


図 4.7 高温下での破壊試験中のケーブルシース温度ならびにガス量の変化

(4) 理論計算結果と実験結果の比較

4種のケーブルの熱破壊条件の理論値と計算値は表4.3により比較することができる。

66 kVPOF, 77 kVOF, 154 kVOFでは両結果が比較的良く一致しているのに対し、230 kVPOFケーブルでは、かなり大きい差を生じている。この原因は先の3種のケーブルでは150°C付近までの誘電正接を実測し、その結果を計算に用いているのに対し、230 kVPOFケーブルの場合のみ100°Cまでの実測値をそのまま延長して用いた点にあり、高温での誘電正接の特性がわずかに異なるだけで実測値と一致する計算値が得られている。

したがって、高温度までの誘電正接特性を用いることにより理論的に熱破壊条件を求め得ると云える。

4.4 実布設ケーブルにおける熱破壊発生の可能性

上述のように、ケーブルの熱破壊条件を理論計算により求め得ることが確認されたので、次に実布設ケーブルに於ける熱破壊発生の可能性を検討する。

この場合、外部熱条件として周囲土壌温度、土壌熱抵抗及びケーブルの埋設寸法が必要となる。

対象ケーブルとして、大都市内の幹線として多条布設されている275 kVOFケーブルを採り上げる。

図4.8は当該ケーブルの埋設寸法を示している。一般にケーブルの許容電流を求める場合の土壌の熱定数は、固有熱抵抗： $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{watt}$ 、土壌基底温度： 25°C とされてお

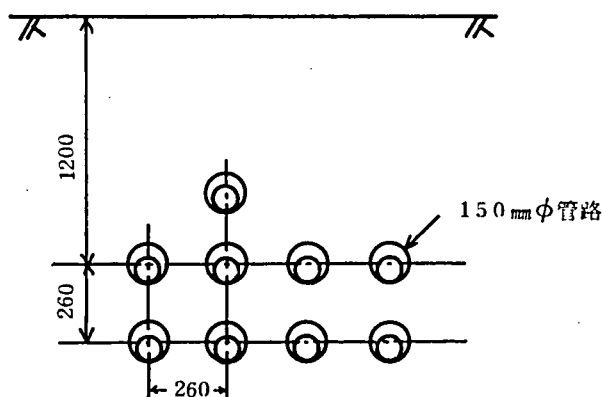


図4.8 ケーブル布設寸法
(275KV1×1200mm²アルミ被OFケーブル)

り、このとき、図 4.8 の埋設寸法での許容電流は約 500A となる。

土壌固有熱抵抗が $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{watt}$ に保たれる限り、ケーブルの最高温度は許容温度内に保たれるので、全く問題は生じない。しかし、長期経過後に地下水位が極端に深くなったり他の原因で土壌が乾燥されると固有熱抵抗は $100\sim 200^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{watt}$ に上昇する可能性がある。

よって他の条件は一定であるとし、土壌固有熱抵抗が変化する場合は熱破壊の可能性を検討した。

その結果、275kVOF の場合は、土壌固有熱抵抗が $120^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{watt}$ をわずかに越えると熱破壊の生じる可能性があることが明らかとなった。

ただし、次の理由により現実に熱破壊が生じることはまれであると考えられる。

- (1) 理論計算は温度上昇が完全に飽和状態に達した場合の熱平衡を問題にしており、そこに達するまでには土壌埋設ケーブルの温度上昇の時定数（通常は数ヶ月）のさらに数倍の時間を要する。この間、全負荷あるいは過負荷が継続することはまれである。
- (2) 我国では一般に地下水が豊富で、土壌熱抵抗は通常 $60\sim 80^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{watt}$ に保たれており、急激な土壌熱抵抗や周囲温度の上昇は生じない。
- (3) 図 4.7 に示しているように数日程度の期間であれば、許容温度をはるかに上まわる 150°C の高温状態でも運転電圧に耐えることができる。

したがって、直ちに実線路において熱破壊が生じることはないが、極端な温度上昇がケーブルの劣化を速め、これが誘電特性を悪化させ、さらに温度上昇を招くという悪循環を繰り返すと、最終的に熱破壊を生じることになる。

このような熱破壊の発生を抑えるため、超高圧ケーブルの発生熱、とくに誘電体損を低減すること、埋設される周囲土壌の状況を把握すること、などが設計時点で考慮されている。

しかし、地中ケーブルシステムの容量が増加し、多数のケーブルが一つの線路に埋設されると、個々のケーブルのわずかな発生損失の増加が全体の温度上昇に結びつくので、埋設ケーブルの温度上昇について厳密な解析が必要となる。この点については次章に詳述する。

4.5 超高圧直流ケーブルの熱破壊^{43), 44), 57)}

交流ケーブルの絶縁体の発生損失は、いわゆる誘電体損であるのに対し、直流ケーブルの場合は、いわゆる漏洩損が生ずる。

その熱量を具体的に計算すると、ケーブル 1 cm 当りの発生熱量は

275kV 交流ケーブル：

$$W_d = \omega C \cdot \tan \delta \cdot V^2$$

$$\div 314 \times 0.312 \times 10^6 \times 10^5 \times 0.15 \times 10^2 \times (275 \times 10^3 / \sqrt{3})^2$$

$$\div 0.042 \text{ (watt/cm)}$$

500 kV 交流ケーブル：

$$W_d \div 314 \times 0.233 \times 10^6 \times 10^5 \times 0.15 \times 10^2 \times (500 \times 10^3 / \sqrt{3})^2$$

$$\div 0.091 \text{ (watt/cm)}$$

250 kV 直流ケーブル

$$W_g = G V^2$$

$$\div 3.35 \times 10^{15} \times (250 \times 10^3)^2$$

$$\div 2.1 \times 10^4 \text{ (watt/cm)}$$

500 kV 直流ケーブル

$$W_g \div 5.0 \times 10^{15} \times (500 \times 10^3)^2$$

$$\div 1.25 \times 10^3 \text{ (watt/cm)}$$

すなわち、同程度の電圧階級のケーブルで比較した場合、直流ケーブルの絶縁体発生損失は交流ケーブルの絶縁体発生損失の約 1/100 となる。

したがって直流ケーブルの場合には前節で検討したような実線路における熱破壊発生の可能性は、ほとんど無視することができる。

一方、直流ケーブルの絶縁性能を把握するための耐電圧試験に際しては、絶縁体中の温度勾配による電界分布の変歪を考慮して、高温状態で試験する場合があります、印加電圧も運転電圧の 3～4 倍に達するので絶縁体の発生損失及び熱破壊の可能性を無視し得なくなる。

以下に、500 kV OF ケーブルを対象にケーブルの温度上昇、熱破壊発生条件及び試験結果との対比を試みる。

4.5.1 直流ケーブルの温度上昇

3章に述べた 500 kV 直流 OF ケーブルは、目標送電電流を 1,000 A としているが今、仮りに 1,300 A を通電したと仮定し、ケーブルの温度上昇を求めてみる。

ただし、実際の試験条件を考慮して、導体通電電流は交流電流であり、導体抵抗は表皮効果を含めると $0.206 \times 10^{-6} \Omega/\text{cm} (20^\circ\text{C})$ となる。

温度上昇の計算は 3章あるいは本章 4.1 節に示した方法によっている。また、絶縁体の直流絶縁抵抗、固有熱抵抗等は 3章に示した値を用いる。

計算結果は、図 4.9 に示す通りである。印加電圧をパラメーターとして、与えられたケーブル防蝕層表面温度に対する導体温度の変化を求めたものである。

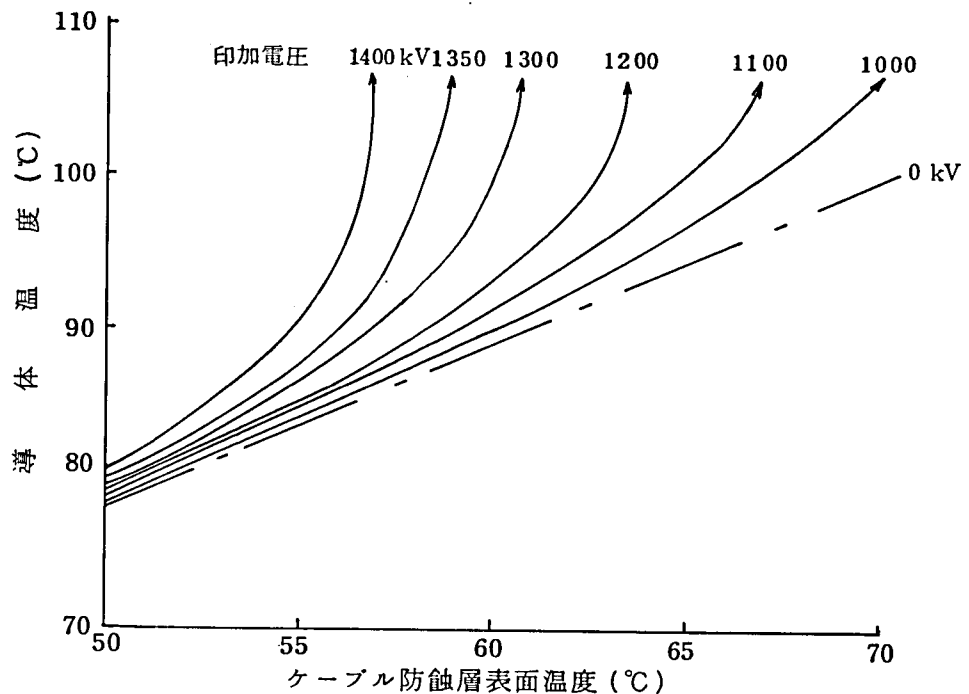


図 4.9 高電圧課電時のケーブル温度
ケーブル防蝕層表面温度 (°C)

例えば、1,200 kV 課電時に、ケーブル防蝕層表面温度が 60°C であれば

$$\text{導体発熱量} \quad WC = 0.437 \text{ watt/cm}$$

$$\text{導体発熱による温度上昇} \quad T_{WC} = 28.8^{\circ}\text{C}$$

$$\text{絶縁体発熱量} \quad W_g = 0.056 \text{ watt/cm}$$

$$\text{絶縁体発熱による温度上昇} \quad T_{Wg} = 4.0^{\circ}\text{C}$$

$$\text{導体温度} \quad TC = 60 + 28.8 + 4.0 = 92.8^{\circ}\text{C}$$

となる。しかし、防蝕層表面温度が 3°C 上昇し、63°C になると

$$WC = 0.460 \text{ watt/cm}$$

$$T_{WC} = 30.3^{\circ}\text{C}$$

$$W_g = 0.256 \text{ watt/cm}$$

$$T_{Wg} = 8.6^{\circ}\text{C}$$

$$TC = 101.9^{\circ}\text{C}$$

となり、導体温度は 9.1°C 上昇する。さらに防蝕層表面温度が 1°C 上昇すると熱放散が発熱に追いつかず、熱不平衡状態となり、理論上は、導体温度が ∞ に達し、熱破壊を生ずる。

また、印加電圧が、運転電圧の 500 kV であれば、絶縁体の発生損失は無視できるので、ケーブル防蝕層温度が 80°C となっても熱不平衡に達することはない。

4.5.2 熱破壊条件の検討

前節の例に示したように、1,200 kV 課電、1,300 A 通電、ケーブル防蝕層表面温度 63°C で保たれていた熱平衡は、表面温度がわずかに上昇することにより破れる。この条件が熱破壊発生臨界条件である。課電々圧、通電々流、防蝕層表面温度を種々変化させるとき、熱破壊が発生する領域を求めると、図 4.10 を得ることができる。但し、通電々流をパラメータとして表示している。

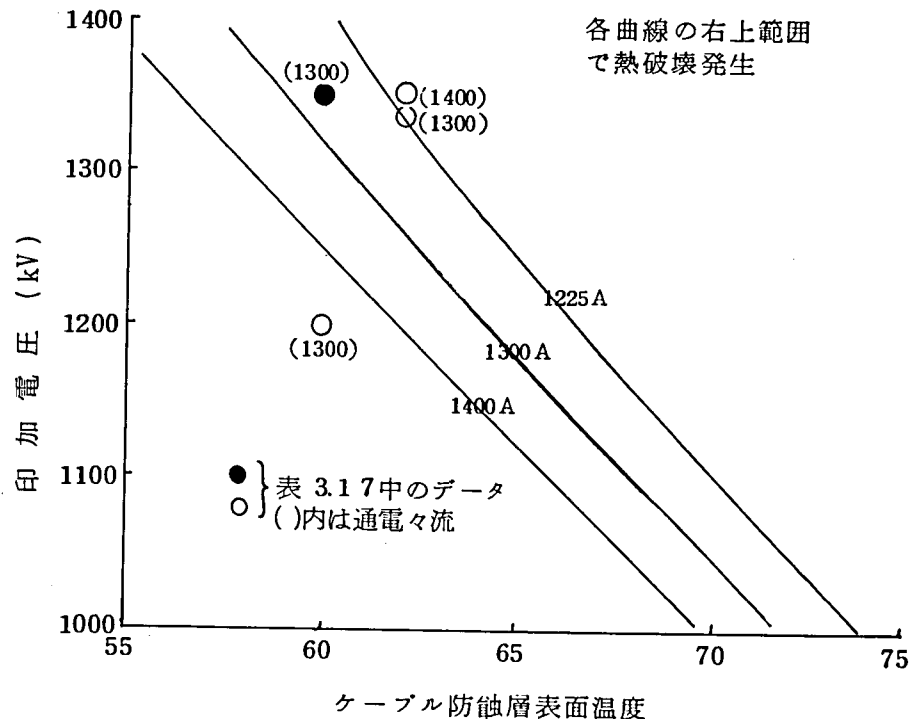


図 4.10 高温、高電圧下における熱破壊発生の可能性

以上の理論計算結果と前述の 500 kV 直流 OF ケーブルの試験結果を対比するため表 3.17 の直流試験時のデータを図 4.10 中にプロットすると、4 例中 3 例は熱破壊条件を満たす領域に入っており、理論計算上は電界分布や温度分布が求まらないことになる。したがって先の表 3.17 中には理論的に熱破壊領域に入る直前の温度と電界の数値を記入してある。

熱破壊領域に入る 3 例中 2 例は絶縁破壊を生じていない。これは計算に用いた諸定数のうち、固有絶縁抵抗がやや高いか、熱抵抗がやや低いこと、試験中のケーブル防蝕層表面温度に測定誤差を伴うこと等によっていると考えられる。

また、図 3.17 に残留水分量の多い同径接続部の耐電圧試験中、900 kV 印加中に洩れ電流が急増し、課電不能となり破壊した例が示されているが、この絶縁破壊は明ら

かに残留水分のために絶縁抵抗が低下し、大きい洩れ電流が流れ、熱破壊を生じたものである。

以上のように、超高圧直流 OF ケーブルにおいては実線路で運転中に熱破壊を生ずることは極めてまれであるが、高温状態での耐電圧試験中に熱不平衡により絶縁破壊を生じる可能性は十分にある。したがって、破壊電圧、或いは破壊強度を評価する場合には、熱破壊現象を考慮しなければならない。

4.6 ま と め

超高圧ケーブルの絶縁性能を正しく評価し、実線路における信頼性を増すため、電力ケーブルの熱破壊現象を理論、実験両面から検討した。その結果、以下の諸点が明らかとなった。

- (1) 交流ケーブルの場合、高温まで実測された誘電正接の温度依存性を用い、熱平衡の極限として厳密に理論計算することにより、実験値とほぼ一致する熱破壊条件を求めることができた。
- (2) 直流ケーブルの場合にも固有絶縁抵抗の温度並びに電界依存性を用いて熱破壊条件を導き得ることを確認した。
- (3) 多条布設の交流ケーブルについて実線路における熱破壊発生の可能性を検討し、まれではあろうがその危険が皆無でないことを見出した。
- (4) 直流ケーブルの場合は、実線路における熱破壊の危険はないが、高温状態での耐電圧試験中に熱破壊を生ずる可能性は大きく、これを考慮して絶縁性能を評価する必要があることを明らかにした。
- (5) 電力ケーブルの熱破壊現象を初めて実験的に確認し、熱破壊にともない、いくつかの特異現象の生ずることを示した。
- (6) 超高圧交流ケーブル系統の設計においては、単に許容温度が満されるか否かという点からだけでなく、熱的に安定しているか否かについても十分検討し、その信頼性をより一層増す必要がある。

第5章 超高圧O F ケーブルの温度上昇と強制冷却

前述のように、超高圧電力ケーブルの絶縁性能は、ケーブルの温度上昇と密接に結びついている。

直接には、熱破壊、熱劣化及び直流ケーブルの電界分布の温度依存性であり、間接的には熱伸縮に伴う金属シースの疲労及び油圧変化である。

従来、地中に埋設された電力ケーブルの温度上昇は、定常状態についてのみ計算法が確立されており、⁵⁸⁾ 負荷の変化に伴う過渡現象については数例の検討がなされているにすぎない。⁵⁹⁾ すなわち、過渡的な温度上昇については計算法が確立されておらず、定常温度上昇に安全を見込んで扱われている。しかし、その見込みが真に安全側でなければケーブルの劣化を速め、熱破壊や金属シースの破損につながる。一方、過度に安全を見込むとそれだけ送電容量が低下するため、線路の経済的運用を制限することになる。

このような観点から、本章では地中埋設ケーブルの負荷変動に伴う温度上昇について検討し新たな計算方法を導くものである。

また、一定の線路でより一層の送電容量を確保するには、発生した熱を奪う必要があり、いわゆる強制冷却方式が採用されることになる。強制冷却時のケーブル温度上昇についても新たに汎用的な計算手法を開発し、実線路への適用を試みる。

以下に、変動負荷に対するケーブルの温度上昇及び強制冷却運転時の温度分布について詳述する。

5.1 変動負荷に対するケーブルの温度上昇の理論解析

5.1.1 基本的考察

時間的に変化しない一定の負荷に対するケーブルの定常的溫度上昇を求めるには、電気回路における直流の場合と同じく熱抵抗成分のみを考慮すれば良く、その計算法についてはJCS168⁵⁸⁾やIECPublication287⁶⁰⁾に諸定数の算出法を含めて実用計算法が記されている。

しかし、変動する負荷に対するケーブルの温度上昇を求めるには、熱容量成分も考慮しなければならず、解析が複雑となる。

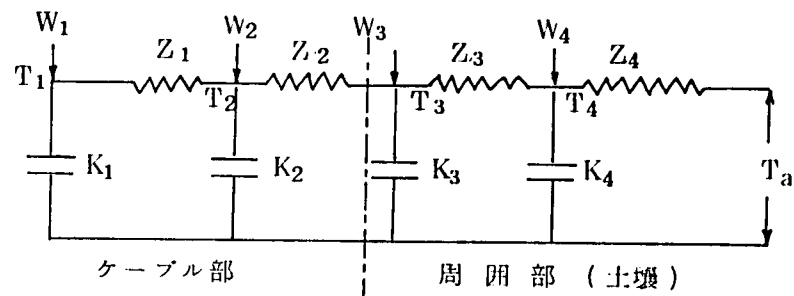
変動する負荷のうち、短時間過負荷のようにステップ関数状の負荷変化に対する過渡的な温度上昇についてはすでに解析が試みられており、^{59), 61)} その結果はO F ケーブルの給油設計や、過負荷送電能力の計算に応用されている。

現実の負荷は複雑な変化を示すが、一定時間、通常は1日を周期として繰り返されることが多く、このような負荷に対しては、定常負荷、ステップ状負荷のいずれに対

する計算方法も適用することはできず、新たな手法が必要となる。このため、筆者は定常的な負荷及びステップ状負荷に対する計算方法を基にして、周期変動負荷に対する温度上昇計算手法を導くものである。^{62), 63)}

5.1.2 熱流の等価回路と過渡温度上昇

ケーブルは布設状態により、様々な熱容量と熱抵抗成分を含むことになる。今、その等価回路が図 5.1 に示す熱抵抗と熱容量の多段回路で表わされるものとする。一般にこのような集中定数による等価回路は、ケーブル部分について成り立つもので、周囲の土壌部分は分布定数回路で表現されることが多い。⁵⁹⁾しかし、ここでは土壌部分に



- T_1, T_2, T_3, T_4 : 各点の温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 T_a : 周囲基底温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 K_1, K_2, K_3, K_4 : 各部熱容量 ($(\text{watt} \cdot \text{s}) / (^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm})$)
 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 : 各部熱抵抗 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm} / \text{watt}$)
 W_1, W_2, W_3, W_4 : 各部発生或いは流入熱 (watt / cm)

図 5.1 ケーブル過渡温度上昇の等価回路

についても集中定数で表わされるものとし、各定数の算出法、及び等価回路の近似性については後述する。

図 5.1 の等価回路で、時間 $t = 0$ で発生したステップ状負荷 W_1, W_2, W_3, W_4 と各部の温度 T_1, T_2, T_3, T_4 との間に次式が成り立つ。ただし、周囲基底温度からの上昇分として取扱えば、 $T_a = 0$ 及び、 $T_1 \sim T_4$ の初期値は 0 となる。

$$[W] = [Y(p)] [T(p)] \quad (5.1)$$

ここに

$$[W] = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \end{bmatrix} \cdot 1 \quad T(p) = \begin{bmatrix} T_1(p) \\ T_2(p) \\ T_3(p) \\ T_4(p) \end{bmatrix}$$

$$[Y(p)] = \begin{bmatrix} pK_1 + \frac{1}{Z_1} & -\frac{1}{Z_1} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{Z_1} & pK_2 + \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} & -\frac{1}{Z_2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{Z_2} & pK_3 + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} & -\frac{1}{Z_3} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{Z_3} & pK_4 + \frac{1}{Z_4} \end{bmatrix}$$

$$1 = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ 1 & (t \geq 0) \end{cases}$$

$$p = \frac{d}{dt}$$

この微分方程式を解き、各部の温度上昇を求めるには

$$[T(p)] = [Y(p)]^{-1} [W] = [Z(p)] [W] \quad (5.2)$$

において、右辺に Heviside 変換を行えば良い。その結果 H を Heviside 変換記号として次式を得る。

$$[T(t)] = [Z(t)] [W] \quad (5.3)$$

$$[T(t=0)] = [0]$$

$$[Z(t)] = H[Z(p)]$$

次に、 W_1, W_2, W_3, W_4 がステップ状関数でなく、 $t=0$ 以降任意に変化する $W_1(t), W_2(t), W_3(t), W_4(t)$ である場合には (5.2) 式から (5.3) 式への変換に de Hammel の定理を適用して、

$$[T(t)] = \frac{d}{dt} \int_0^t [Z(t-\tau)] [W(\tau)] d\tau \quad (5.4)$$

を求めれば良い。

これらの演算子計算方法については参考文献⁶⁴⁾に詳細に記されている。

5.1.3 周期変動負荷に対するケーブルの温度上昇

上述の (5.1) ~ (5.4) 式は、 $t < 0$ で発生熱がなく定常状態にある場合に成り立つ。周期変動負荷に対するケーブルの温度上昇を求めるには、まず $[T(t=0)] = [T_0] \neq [0]$ の初期値を持つ場合の方程式を解かねばならない。このとき (5.2) 式は

$$[T(p)] = [Z(p)] \{ [W] + p [K] [T_0] \} \quad (5.5)$$

で表わされる。ここに

$$[K] = \begin{pmatrix} K_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_4 \end{pmatrix}$$

$$[T_0] = \begin{pmatrix} T_{01} \\ T_{02} \\ T_{03} \\ T_{04} \end{pmatrix}$$

今、発生熱量が、 τ_c を1周期として繰り返される場合を考え、 i 周期目の温度を $[T_i(t)]$ ($0 \leq t < \tau_c$) とする。但し、 i 周期目の開始時点をも $t=0$ 、終了時点をも $t=\tau_c$ とする。

このとき、 $[T_i(t=0)] = [T_{i-1}(t=\tau_c)]$ が成り立つので (5.5) 式は

$$[T_i(p)] = [Z(p)] \{ [W] + p[K][T_{i-1}(t=\tau_c)] \} \quad (5.6)$$

と変形される。ここで Heviside 変換を行うと次式となる。

$$[T_i(t)] = [F(t)] + [G(t)][T_{i-1}(t=\tau_c)] \quad (5.7)$$

ただし、

$$[F(t)] = H[Z(p)][W]$$

$$= \frac{d}{dt} \int_0^t [Z(t-\tau)][W(\tau)] d\tau \quad (5.8)$$

$$[G(t)] = H[Z(p)]p[K] \quad (5.9)$$

(5.7) 式に $[T_{i-1}(t=\tau_c)]$, $[T_{i-2}(t=\tau_c)]$, ..., $[T_0]$ を代入すると

$$[T_i(t)] = [F(t)] + [G(t)] \left\{ \frac{[1] - [G(t=\tau_c)]}{[1] - [G(t=\tau_c)]} [F(t=\tau_c)] + [G(t=\tau_c)]^{i-1} [T_0] \right\} \quad (5.10)$$

となり、これより、 $[W(t)]$ ($0 \leq t < \tau_c$) で繰り返される周期変動負荷に対する i 周期目の温度が求められる。

図 5.1 の等価回路の場合、各行列は以下のとおりである。

$$[K] = \begin{pmatrix} K_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_4 \end{pmatrix}$$

$$[Z] = \begin{pmatrix} Z_1+Z_2+Z_3+Z_4 & Z_2+Z_3+Z_4 & Z_3+Z_4 & Z_4 \\ Z_2+Z_3+Z_4 & Z_2+Z_3+Z_4 & Z_3+Z_4 & Z_4 \\ Z_3+Z_4 & Z_3+Z_4 & Z_3+Z_4 & Z_4 \\ Z_4 & Z_4 & Z_4 & Z_4 \end{pmatrix}$$

$$[A] = [K]^{-1} [Z]^{-1}$$

$$\left. \begin{aligned} [Z(t)] &= [1] - e^{-[A] \cdot t} [Z] \\ [G(t)] &= e^{-[A] \cdot t} \end{aligned} \right\} \quad (5.11)$$

周期変動負荷の繰り返しが長時間続いたとき、ある周期内では変化するが、 i 周期と $(i+1)$ 周期では全く同じ変化となり、いわゆる周期的な定常状態に達する。この場合の温度変化は以下のようにして求められる。すなわち、 $i \rightarrow \infty$ の状態では (5.11) から明らかなように、

$$\lim_{i \rightarrow \infty} [G(t=\tau_c)]^{i-1} = [0] \quad (5.12)$$

が成り立つので (5.11) 式は

$$[T^\infty(t)] = [F(t)] + [G(t)][F(t=\tau_c)] \{ [1] - [G(t=\tau_c)] \}^{-1} \quad (5.13)$$

となる。

すなわち、(5.8)~(5.10) 式により $[F(t)]$, $[F(t=\tau_c)]$, $[G(t)]$, $[G(t=\tau_c)]$ を求め、これを (5.13) 式に代入すれば定常変化を示す $0 < t < \tau_c$ の 1 周期内のケーブル温度を求めることが可能となる。

5.2 熱流等価回路の近似性

5.2.1 分布定数回路による取扱い

本章では土中に埋設されたケーブルの熱流等価回路が図 5.1 の K、Z の集中定数回路で表わされるものとしている。このうち、ケーブル本体部は 2 段のいわゆる CR 回路で等価的に表わされ、実用上問題のないことが確認され、各定数の算出方法についてもまとめられている。⁶³⁾ しかし、土壤部分については、従来分布定数回路として扱われており、その過渡解は積分指数関数となる。

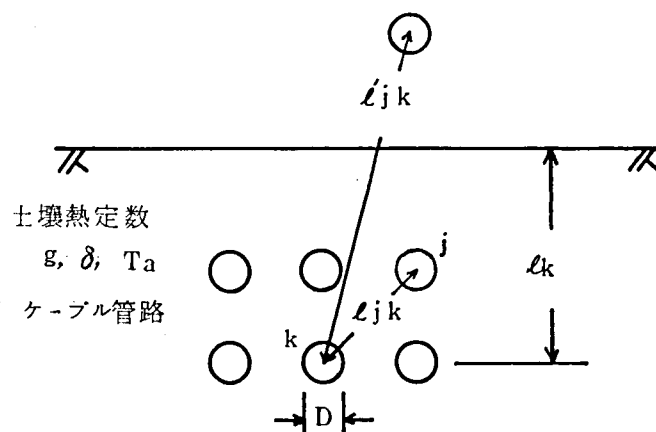


図 5.2 土中埋設ケーブルの管路配置

今、図 5.2 に示すような配置でケーブルが埋設されている場合には、管路外の土壌部分による温度上昇は次式で表わされる。ただし、各管路で $t = 0$ の時点から W (watt/cm) の発熱が生じたものとする。

$$T_k(t) = \frac{W \cdot g}{4\pi} \left\{ -E_i \left(-\frac{D_k^2}{16\delta t} \right) + E_i \left(-\frac{\ell_k^2}{\delta t} \right) + \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq k)}}^N \left\{ -E_i \left(-\frac{\ell_{jk}^2}{4\delta t} \right) + E_i \left(-\frac{\ell'_{jk}{}^2}{4\delta t} \right) \right\} \right\} + T_a \quad (5.14)$$

ここに

T_k : k 番管路の温度上昇 ($^{\circ}\text{C}$)

W : 各管路の発生熱量 (watt/cm)

g : 土壌固有熱抵抗 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm} / \text{watt}$)

$-E_i(-x)$: 指数積分関数 $= \int_x^{\infty} \frac{\exp(-u)}{u} du$

δ : 土壌熱拡散係数 (cm^2 / s)

D_k : k 番管路の直径 (mm)

ℓ_k : k 番管路の埋設深さ (mm)

ℓ_{jk} : j 番回路と k 番管路の離隔距離 (mm)

ℓ'_{jk} : j 番管路の地表面に対する鏡像と k 番管路の離隔距離 (mm)

N : 管路総数

(5.14) 式と、図 5.1 のケーブル部の 2 段 CR 回路を結合させれば、ケーブル全体の過渡温度変化が計算できるが、その場合、(5.1) ~ (5.3) のように i 周期目の温度変化を数式として解くことはできず、初期状態から i 周期までを逐次数値計算する必要がある。したがって、周期変動負荷によるケーブル温度上昇計算を容易にするには、図 5.1 のような CR 集中定数回路に置き換える必要がある。土壌部分の CR 回路の段数を非常に大きくすれば、(5.14) 式を近似できることは明らかであるが、行列の次数が多くなり、実用計算方法として不適当となる。このため、CR 回路の簡略化が重要な問題となる。

5.2.2 CR 集中定数による等価回路

まず、土壌を CR の一段回路で表わした場合の (5.14) 式との近似性を検討する。

図 5.1 で Z_4, K_4 がない場合に相当する。

温度飽和状態での温度を一致させなければならぬため、抵抗分 Z_3 は、(5.14) 式において $t \rightarrow \infty$ として得られる通常の土壌部分の熱抵抗算出式により表わされる。

$$Z_3 = \frac{g}{2\pi} \left\{ \log \frac{4\ell_k}{D_k} + \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq k)}}^N \log \frac{\ell'_{jk}}{\ell_{jk}} \right\} \quad (5.15)$$

また、 K_3 は、(5.14) 式で $T(t=t_c)=0.632 \cdot T(t \rightarrow \infty)$ となる時定数 t_c を求め、 $K_3 Z_3 = t_c$ から

$$K_3 = t_c / Z_3 \quad (5.16)$$

と決定される。

次に、土壌を 2 段階路で表わす場合を検討する。

熱抵抗成分については、(7.15) 式と同様に

$$Z_3 + Z_4 = \frac{g}{2\pi} \left\{ \log \frac{4\ell_k}{D_k} + \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq k)}}^N \log \frac{\ell'_{jk}}{\ell_{jk}} \right\} \quad (5.17)$$

が成り立ち、仮にこれを $Z_3 = Z_4$ とおく。熱容量の K_3, K_4 を純理論的に導出することは不可能であるため、試行錯誤で妥当な算出法を試み、その結果、以下の方法によれば (5.14) 式を近似できることを見出した。

$$\left. \begin{aligned} K_3 &= C_g \pi D_k^2 \\ K_4 &= C_g \pi D'^2 \end{aligned} \right\} \quad (5.18)$$

ここに、 C_g : 土壌の単位体積当りの熱容量 ($\text{watt} \cdot \text{sec} / ^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^3$)

$$D' = 2D_k \exp[\pi(Z_3 + Z_4)/g]$$

である。 K_3 は、 k 番管路の直径 D_k の 2 倍の部分に含まれる熱容量に相当し、 K_4 は土壌中の温度上昇が半分となる等価直径 D' の 2 倍の部分に含まれる熱容量に相当する。(5.18) 式が妥当なことを理論的に明確にすることはできないが、一つの管路に注目したとき、その周囲の温度はおおよそ距離に反比例して低下し、 D_k 付近の温度は中心から $2D_k$ 程度の範囲の平均温度となり、 D' 付近の温度は、影響を及ぼす範囲の平均温度に近くなるために (5.14) 式を近似できるものと考えられる。

以上のようにして求めた CR 等価回路が成り立つか否かを具体例で検討する。

管路布設条件を図 5.3 に示す。図 5.3 (a) は単一孔の場合であり、(b) は 9 孔の場合である。(5.14) 式、CR 1 段等価回路、CR 2 段等価回路で管路の温度上昇を求めると、図 5.4 を得る。

CR 1 段回路の場合、その導出過程から明らかなように $t=0$, t_c , $t \rightarrow \infty$ においては (5.14) 式に一致するが、その他の時間領域ではかなりの誤差を生じている。これに対し、CR 2 段回路の場合は、途中でやや誤差の生じる領域があるが、全領域に対してよく一致している。

CR 回路をさらに多段にすれば、2 段回路のわずかな誤差をなくすることができるが Z_3, Z_4, Z_5 及び K_3, K_4, K_5 の決定がむずかしく実用的ではない。

すなわち、図 5.1 に示した等価回路は、ケーブル部及び土壌部両者に対し成り立つ実用的な等価回路であると云える。

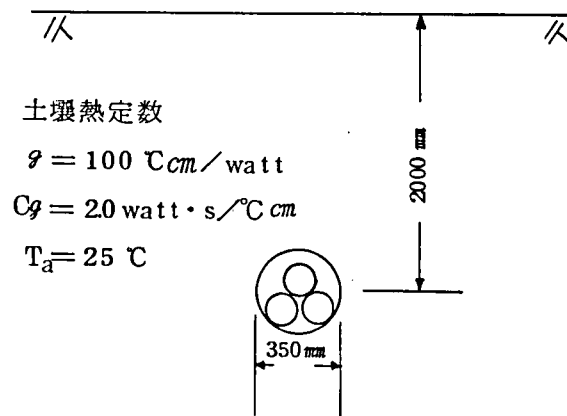


図 5.3 (a) ケーブル布設管路寸法 (単一管路)

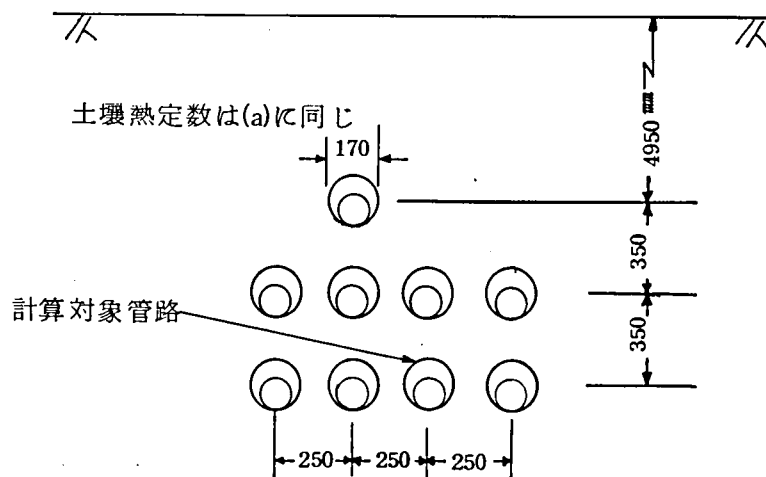


図 5.3 (b) ケーブル布設管路寸法 (多孔管路)

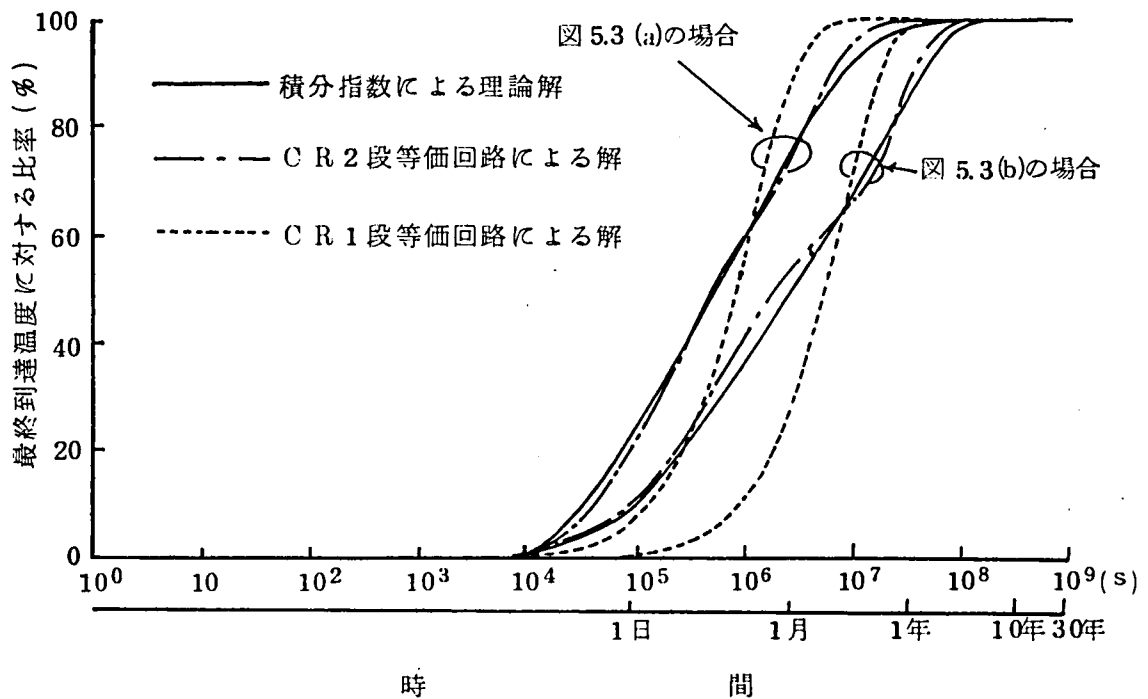


図 5.4 土壤部分の温度上昇の理論解と近似解の比較

5.3 周期変動負荷に対するケーブルの温度上昇

上述の計算法により、実際の地中送電線路中における温度上昇を求める。一つは 275 kV、アルミシース OF ケーブル が所定の負荷に対し、許容温度以内に保たれていること及び日間の温度変化が想定した値を越えないことを確認するものであり、一つは激しく変動する負荷に対する容量増加の可能性を検討したものである。

5.3.1 主幹線用 OF ケーブルの場合

与えられた条件は、表 5.1 及び図 5.5 のとおりである。このような条件の下に、ケーブルの最高温度並びに日間温度変化幅を求める従来の方法は以下のとおりである。

土壤部分の温度上昇時定数は数ヶ月のオーダーとなるため、日間の変化を平均化し、いわゆる負荷の損失率を考慮した平均発生損失と土壤部分の熱抵抗の積で管路の温度上昇 ΔT_e を求める。また、ケーブル部分については、時定数が数時間のオーダーとなるため、日間の最大電流による発生損失とケーブルの熱抵抗の積によるケーブル部単独の温度上昇 ΔT_c 、あるいは日間最小電流による温度上昇 $\Delta T'_c$ を求める。このとき、ケーブル最高温度 T_{max} は、周囲基底温度 T_a と ΔT_e 、 ΔT_c の和によって表わされ、日間温度変化は ΔT_c と $\Delta T'_c$ の差によって表わされるものとしている。この方法による計算結果が表 5.2 の従来の計算法による温度である。

表 5.1 275kVアルミシースOFケーブルの
温度上昇計算条件

項 目	条 件 或 い は 数 値
ケ ー ブ ル 種 類	275kV 1×1200mm ² OFケーブル
ケ ー ブ ル 熱 定 数	J C S 168
負 荷 電 流	図 5.5 に示す
布 設 寸 法	図 5.3 (b) に示す
土 壌 熱 定 数	$g = 100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{watt}$ $Cg = 2.0 \text{ watt}\cdot\text{s}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^2$ $T_a = 25^{\circ}\text{C}$

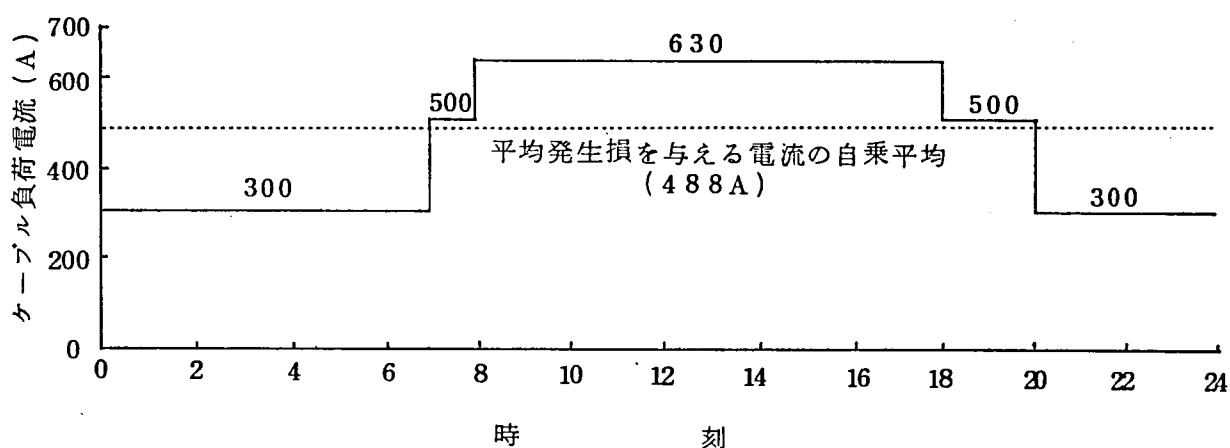


図 5.5 ケーブルの日間負荷電流の変化

これに対し、本章に示した時刻毎の負荷変動を考慮した温度上昇の計算結果は、図 5.6のとおりとなる。これより最高、最低温度及び温度変化幅を求めると表 5.2 中の新しい計算法による計算結果を得る。

両者を比較すると温度の絶対値としては $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ の差であるが、従来法の結果によれば最高温度が許容値 85°C を越えるため、許容負荷を減らすか、ケーブルサイズを

表 5.2 275kV1×1200mm²アルミシースOFケーブル
の温度上昇計算結果

温度 \ 計算方法	従来の計算法 による温度(℃)	新しい計算法 による温度(℃)
最高温度(℃)	86.8	85.0
最低温度(℃)	81.4	82.6
日間変化幅(℃)	5.4	2.4

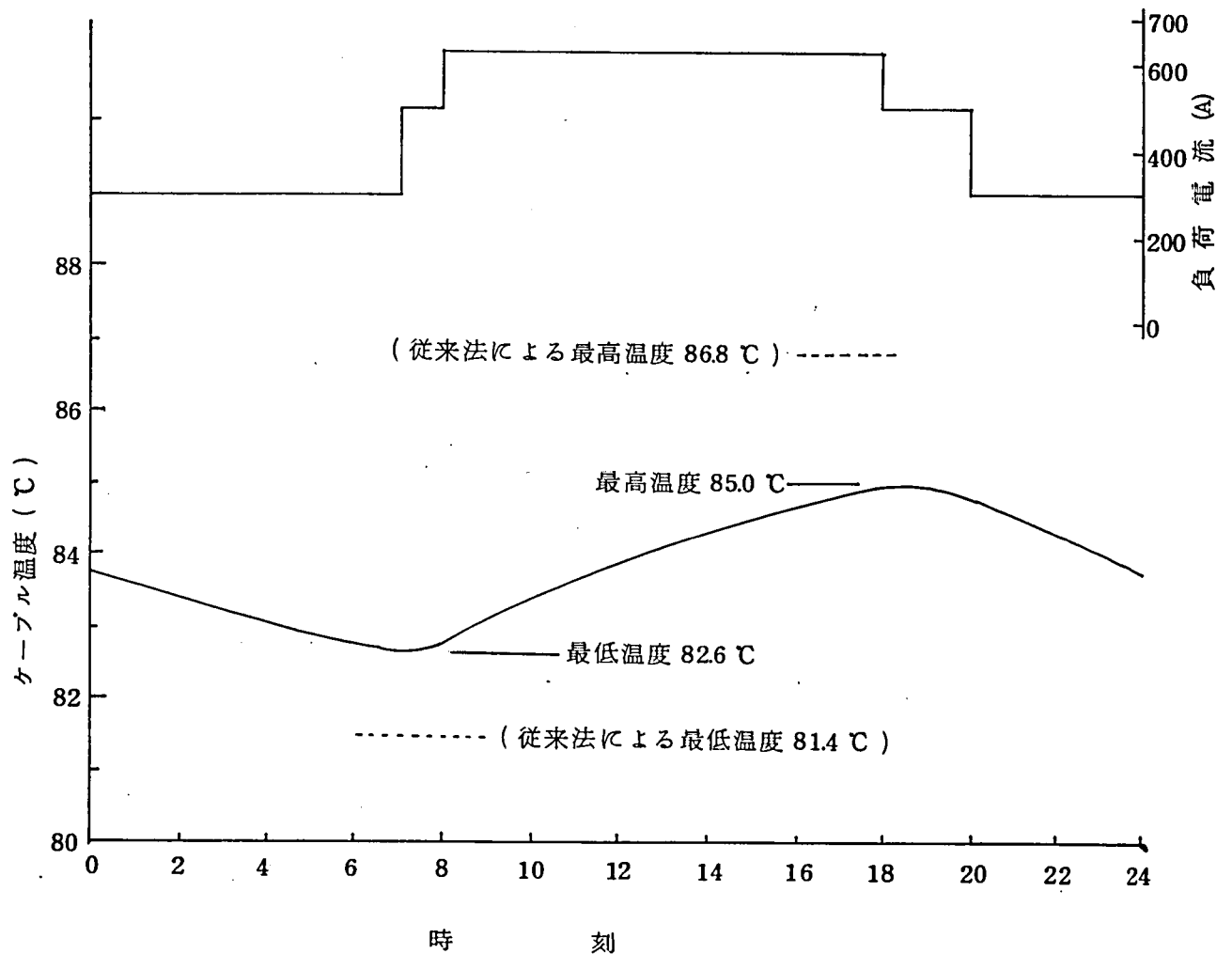


図 5.6 負荷変動に伴うケーブル温度変化

大きくしなければならないという結論に達するのに対し、新計算法によれば、最高温度は 85°C に保たれ、現状のケーブルで送電可能であると判断できることになる。

また、日間温度変化をみたとき、新計算法の変化幅は従来法の変化幅の $1/2$ 以下となっており、この変化幅が小さいことはケーブルの日間熱伸縮量が小さくなることを意味するので、伸縮吸収用の曲り部（オフセット部）の寸法が縮小可能となる。

負荷を低減したり、ケーブルサイズを大きくする必要のないことはケーブルのコスト低減につながり、またオフセット寸法を縮小することは人孔の土木工事費の節約につながる。

したがって、新計算法によりケーブルの温度上昇を正確に把握することにより、ケーブル線路の経済性を高めることができる。

5.3.2 変動負荷につながるO F ケーブルの場合^{62), 63)}

電車負荷や電気炉負荷につながるケーブルには激しく変化する電流が間欠的に流れる。従来このような負荷に対する許容値を決定するには、経験と実績に基づくか、あるいは一時間毎に平均発生損失に相当する電流を求め、これより図5.5に相当する負荷曲線を決定し、前節に述べた方法により温度上昇を推定する方法がとられている。従来の計算方法と本章に導いた計算方法を比較するため変動負荷の下で運転されている線路の容量増加を例としてとりあげてみる。

ケーブル、負荷及び布設条件は表5.3及び図5.7に示すとおりである。

本章の計算法により求められる負荷（図5.7）に対応したケーブルの導体温度は、図5.8の実線のようになり、最高温度は17時40分に 70.9°C に達する。また、従来法により一時間毎の平均発生損失から求めた最高温度は 65.8°C となり、 5.1°C だけ低目に算出される。

表 5.3 電車負荷用ケーブルの温度上昇計算条件

項 目	条 件 あ る い は 数 値
ケ ー ブ ル 種 類	275 kV 1×800 mm^2 OFケーブル
ケ ー ブ ル 熱 定 数	J C S 168
負 荷 電 流	図 5.7
布 設 寸 法	図 5.3 (a)
土 壌 熱 定 数	$g = 80^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{watt}$ $q = 2.1 \text{ watt}\cdot\text{s}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}$ $T_a = 25^{\circ}\text{C}$

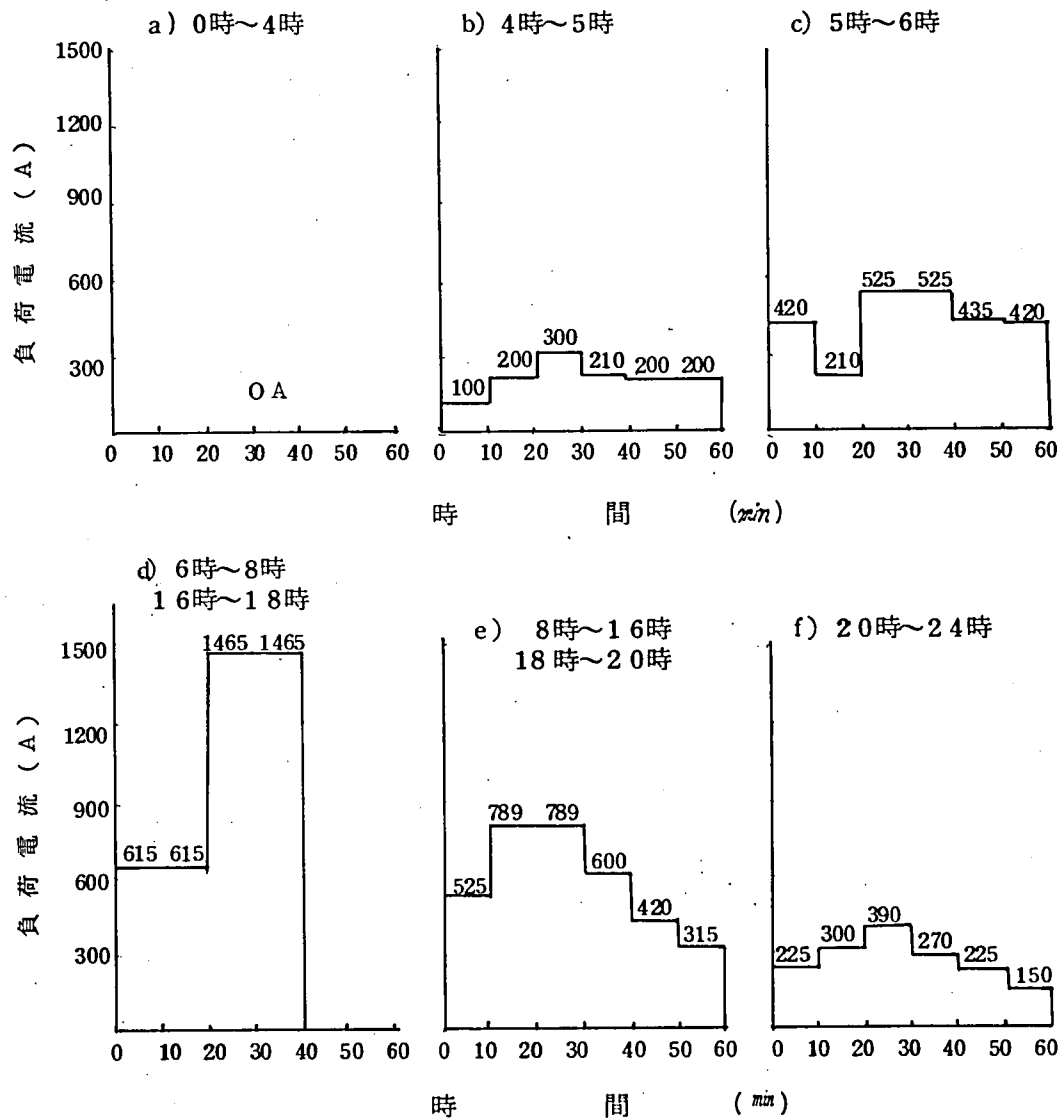


図 5.7 ケーブルの負荷電流
((a)～(f)の各パターンが各々の時刻内で繰り返される)

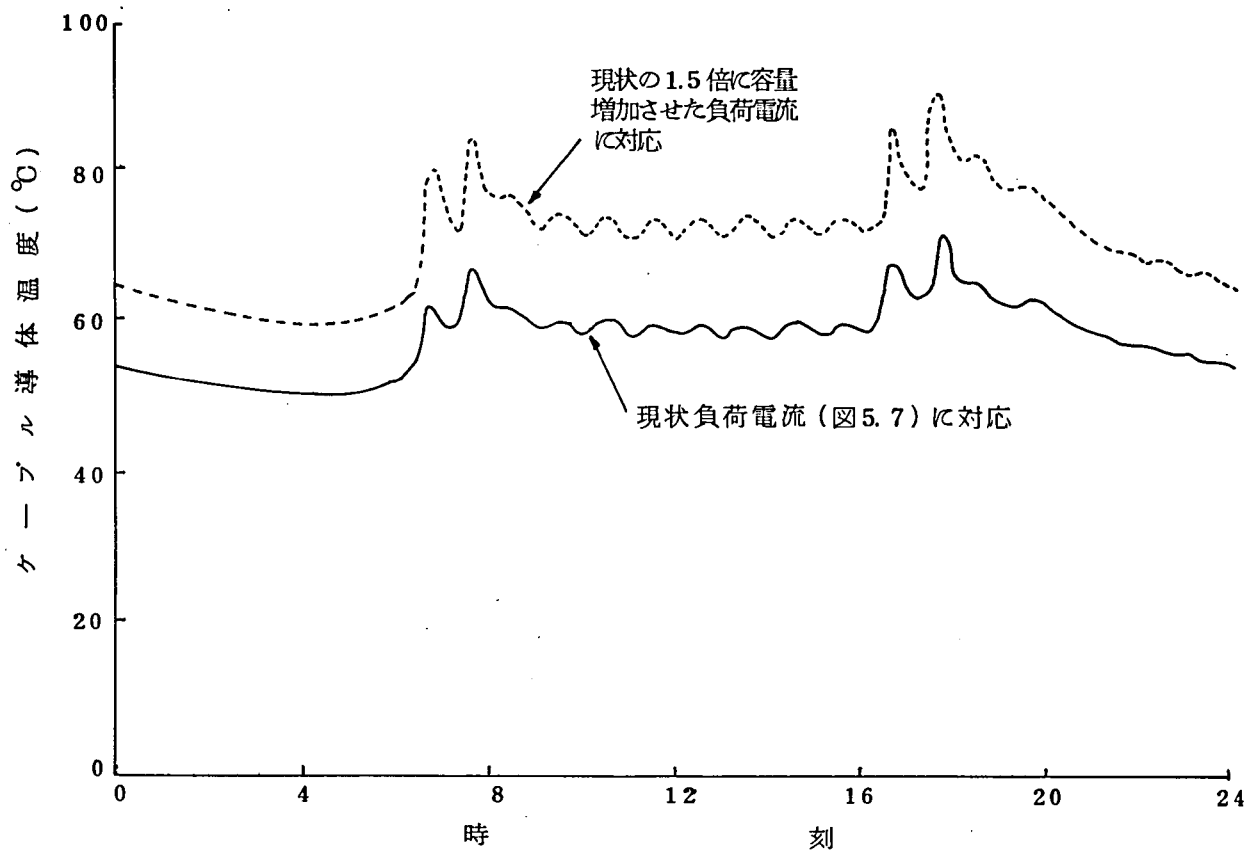


図 5.8 ケーブル導体温度の時間変化計算例

これに対し、現状の負荷を1.5倍に増容量化した場合の導体温度は、図5.8の点線のようになり、最高温度はやはり17時40分に89.2℃となる。この場合に一時間毎の平均発生損失から求めた最高温度は83.0℃である。

以上の各負荷並びに計算法による最高温度をまとめたものが表5.4である。

表 5.4 ケーブル最高導体温度の比較

負 荷 計 算 法	現 状 負 荷 (図 5.7)	1.5 倍増容量 (図 5.7 の 1.5 倍)
本文に導いた方法	70.9℃	89.2℃
1時間平均発生損失による 従 来 の 計 算 法	65.8℃	83.0℃

すなわち、ケーブルの導体最高許容温度 85℃ に対し従来の計算法を用いた推定によれば、1.5 倍の増容量化は可能という結論となる。しかし、本文に導いた厳密な計算法によると最高温度は 89.2℃ となり、許容値を越え 1.5 倍の増容量化は不可能となる。

5.3.1 節と 5.3.2 節の計算例から以下の諸点が明らかとなる。

- (i) 主幹線の負荷につながるケーブルの場合には、一時間平均発生損を基とした従来の計算方法により求めた導体温度は、本文の新しい計算法により求めた導体温度よりも高目に算出されるため、ケーブル使用上は安全側となる。しかし、場合によっては不経済な使用となる恐れがある。
- (ii) はげしく変動する負荷につながるケーブルの場合には従来法による計算方法では低目の温度を算出することになり、ケーブルの熱的、機械的劣化という観点からは危険側となる。
- (iii) したがって、超高圧ケーブルを安全に、且つ経済的に設計し、使用するには、本文で提案した厳密な導体温度変化を求め、その結果に基づいて許容負荷を決定しなければならない。

5.4 強制冷却の理論解析

土地を有効活用し、送電線路の経済性を高めるには限られた線路で大容量の電力を送電する必要がある。送電容量を制限しているものは、ケーブルの種々の発生損失による温度上昇であり、とくに地中埋設ケーブルに於ては、周囲土壤による温度上昇が大きい比率を占める。したがって、ケーブル発生損失を土壤中に自然放散させず、水あるいは空気を介して大気中に放散させることにより、より多くの発生損が許容でき、送電容量を増加させることができる。

このような背景から、ケーブルへの強制冷却方式の適用は以前から検討されてきている。しかし、これらの検討ではケーブルや冷却管の数が少ない場合や、埋設条件が一定の場合

を対象としており、実際の大容量系統で、ケーブルが多数布設され、埋設条件が一定でない状態に対しては十分な検討がなされていない。

本章では、超高圧ケーブルを対象に、実際の長距離線路に適用可能な理論解析手法を開発し、設計への応用を試みる。

5.4.1 基本解析^{65), 66)}

今、ケーブルや冷却用パイプが図 5.9 の状態で布設されている場合を考える。各管の距離 x 点での温度は、各管の発生熱量、冷却水の奪う熱量及び各管相互間のポテン

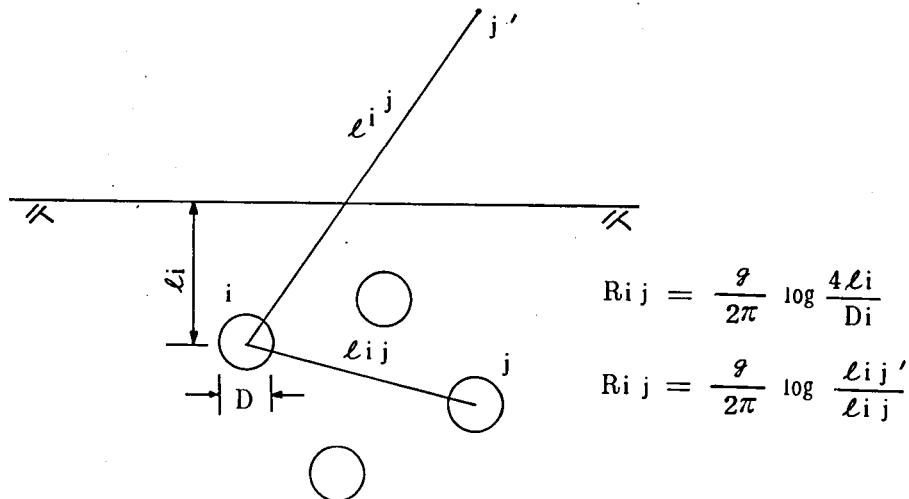


図 5.9 ケーブル及び冷却管の埋設条件

シャル係数によって表わされる。すなわち、

$$[T] = [R] \left\{ [W] - \frac{d}{dx} [CW] [q] \right\} + [Ta]$$

$$[T] = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_N \end{bmatrix} \quad [R] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1N} \\ R_{21} & R_{22} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ R_{N1} & \cdots & \cdots & R_{NN} \end{bmatrix}$$

$$[W] = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_N \end{bmatrix} \quad [q] = \begin{bmatrix} q_1 & & & 0 \\ & q_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & q_N \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{matrix} [T] \\ [W] \\ [q] \end{matrix} \right\} (5.19)$$

ここに T_i : $i=1 \sim N$ の各管の温度 ($^{\circ}\text{C}$)

R_{ii} : $i=1 \sim N$ 各管の自己熱抵抗 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}/\text{watt}$)

R_{ij} : $\left. \begin{matrix} i=1 \sim N \\ j=1 \sim N \end{matrix} \right\} i, j$ 間の相互熱抵抗 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}/\text{watt}$)

T_a : 土壤基底温度 ($^{\circ}\text{C}$)

W_i : $i=1 \sim N$ 各管内の発生損失 (watt/cm)

q_i : $i=1 \sim N$ 各管内の冷却水流量 (cm³/s)

C_w : $i=1 \sim N$ 各管の冷却水比熱 (watt·s/cm³°C)

従来、(5.19)式の解法として Runge-Kutta-Gill 法など微分方程式の数値解法がとられてきたが、 x 方向の分割距離による誤差及び入口側、出口側の境界条件を満たすまでの繰り返し計算の収束性などに問題を生ずることが多く、実用上 $i=3$ までの制限されている。このため、(5.19)式を行列演算のまま解いてみる。

すなわち (5.19) 式で

$$[AX] = [R][C_w q]$$

$$[BX] = [R][W]$$

と置いて

$$[AX] \frac{d}{dx} [T] + [T] = [BX] + [T_a]$$

さらに

$$[AY] = [AX]^T \text{ により}$$

$$\frac{d}{dx} [T] + [AY][T] = [AY][BX] + [AY][T_a]$$

最終的に

$$[T - T_a] = ([1] - e^{-[AY] \cdot x}) [BX] + e^{-[AY] \cdot x} [T_{in} - T_a] \quad (5.20)$$

と解ける。ただし、ここでは次式を入口側の境界条件とする。

$$[T]_{x=0} = [T_{in}]$$

(5.20)式は、Sylvester の展開定理を用いることにより、(5.21)式のように表わされる。

$$[T] = \sum_{k=1}^N \left\{ ([1] - [S]_k e^{-\alpha_k \cdot x}) [BX] + [S]_k e^{-\alpha_k \cdot x} [T_{in} - T_a] \right\} + [T_a] \quad (5.21)$$

α_k : $[AY]$ の固有値

$[S]_k$: 展開係数

$$= \frac{N}{\prod_{\substack{j=1 \\ (j \neq k)}} \frac{\alpha_k [1] - [AY]}{\alpha_k - \alpha_j}}$$

5.4.2 直接冷却、間接冷却への応用

実際のケーブル系統において採用されている冷却方式を分類すると、表 5.5 となる。同表中には各方式の特徴も合わせて記している。

洞道風冷の場合は、埋設管が一本に相当するので (5.19) ~ (5.21) は行列表示でなく表され、計算は簡単となる。この方法により、220kV 系統のケーブル冷却設計を

実施し、実際の効果も確認されている⁶⁷⁾。一方、直接水冷と間接水冷は管路布設ケーブルに適用されており、ケーブルや冷却管の数が多くなるため、ここに開発した手法を用いねばならない。

表 5.5 各種冷却方式の比較

方式 \ 項目	特 徴	容 量 倍 数
洞 道 風 冷	トンネル内に外気を吸い込み、他端から吹き出す。空気の熱容量が小さいため、大きい冷却効果は望めない。大型換気扇の取付運転のみで適用可能。	1.2 ~ 1.5 倍
間 接 水 冷	ケーブルに平行して冷却水管をおき、これに冷却水を流す。ケーブルの発熱を間接的に奪うため、冷却能力は大きくないが、独立設備として設置できる。	1.3 ~ 1.8 倍
直 接 水 冷	ケーブルを冷却水管内に布設し、ケーブル発熱を直接奪う。冷却能力は大で、今後の適用が拡大すると考えられる。	2 ~ 3 倍
内 部 冷 却	ケーブル導体内の油、または導体中に設けたパイプ内に冷媒を流し、導体の発熱を奪う。冷却効果は最大となるが、長距離線路への適用は困難。	2 ~ 5 倍

(5.19)~(5.21)式は対象としている管のすべてに発生損失が生じ、冷却水が流れている場合に成り立つものである。このうち発生損失は、0であっても、全く同一の手法が適用できるが、冷却水が流れていない管がある場合（例えば間接水冷に於けるケーブル布設管）には式の取り扱いが異なる。この場合、基本式は次式となる。

$$\begin{aligned}
 [T] &= [R] \left\{ [W] - \frac{d}{dx} C_w(q) [T] \right\} + [T_a] \\
 [T] &= \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_k \\ \vdots \\ T_{k+1} \\ \vdots \\ T_N \end{bmatrix} \quad [R] = \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ R_{k1} & \cdots & R_{kN} \\ \vdots & & \vdots \\ R_{N1} & \cdots & R_{NN} \end{bmatrix} \\
 [W] &= \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_N \end{bmatrix} \quad [C_q] = \begin{bmatrix} C_1 q_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & C_k q_k & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (5.22)$$

$[C_w q]$ の対角成分に 0 を含むため、そのまま解くことはできない。この場合には、微分方程式として $i = 1 \sim k$ の成分を含む部分のみを考え、これを (5.21) のように解けば、 $T_1 \dots T_k$ が求まり、これを (5.22) に代入すれば、 $T_1 \dots T_k \cdot T_{k+1} \dots T_N$ のすべてが解ける。

以上のようにして、最初に冷却管に着目して微分方程式を解き、これを基本式に戻すことにより、任意の管で $W_i = 0$ あるいは $C_w q_i = 0$ である場合にも解けることになる。すなわち、直接冷却、間接冷却及びこれらを組み合わせたいずれの場合に於ても解析可能となる。

5.4.3 一般的な冷却、布設条件への応用

上記の手法により、埋設寸法、土壤条件、冷却条件が一定である一区間についてはケーブル各部の温度、或いは必要冷却条件を求めることができる。しかし、一般の線路に於ては、さらに複雑な状況となる。すなわち

- (i) 冷却ルートは数 km 以上となり、その全長の埋設寸法や土壤の熱条件は一定でない。全長を多数の区間に分割し、各区間での寸法や条件を考慮する必要がある。
- (ii) 冷却水は往復循環される場合が多く、境界条件として、入口温度だけでなく、出口温度、或いは往路の冷却水がそのまま復路の冷却水として循環される場合等も含めて解析しなければならない。

このような実用線路に対して、前節の手法を拡張した解析方法が導かれる。

今、第 I 区間の入口側の水温を $[T_{in}]$ と仮定する。 $T_{in1}, T_{in2} \dots T_{inN}$ のうちには未知数も含まれる。このとき、第 I 区間の出口側温度は、(5.20) 式により

$$[T - T_a]_{x=L_I} = ([1] - e^{-[AY]I L_I}) [BX]_I + e^{-[AY]I L_I} [T_{in} - T_{aI}] \quad (5.23)$$

となる。但し、 L_I : 第 I 区間の長さ、 I : 第 I 区間を示す。この第 I 区間の出口温度が、第 II 区間の入口温度となるので、第 II 区間の出口温度は同様にして

$$[T - T_a]_{x=L_I+L_{II}} = ([1] - e^{-[AY]II L_{II}}) [BX]_{II} + e^{-[AY]II L_{II}} \left\{ ([1] - e^{-[AY]I L_I}) [BX]_I + e^{-[AY]I L_I} [T_{in} - T_{aI}] + T_{aI} - T_{aII} \right\} \quad (5.24)$$

以下、順次、第 N 区間まで求めると、最終区間の出口温度 $[T_{ex}]$ と最初の区間の入口温度 $[T_{in}]$ の間には

$$[T_{ex}] = [A] [T_{in}] + [B] \quad (5.25)$$

という関係が成り立つ。ここで $[A]$, $[B]$ は (5.24) 式の行列演算から得られる定数である。

したがって、(5.25) 式と冷却水の往復の組み合わせを考えると、 $[T_{in}]$ 及び

[Tex] のすべてをとりあえず未知数として

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \\ [C] \\ 0 \\ [E] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ & \ddots \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{in1} \\ T_{in2} \\ \vdots \\ T_{inN} \\ T_{ex1} \\ \vdots \\ T_{exN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[B] \\ [T_{in}] \\ [Tex] \\ [0] \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

なる連立方程式が成り立つ。ここに

[A], [B] : (5.25) 式の係数

[C] : 入口温度 [Tin] が与えられる所で 1 他は 0

[D] : 出口温度 [Tex] が与えられる所で 1 他は 0

[E] : 入口側か出口側で冷却水が循環路を形成する接続をなされたとき、その 2 本の一方が 1 他方が -1、その他は 0

(5.26) 式を解くことにより、既知及び未知のすべてを含んだ入口、出口水温を求めることができる。

線路長さ方向の温度分布を知るには、[Tin] を用いて (5.23), (5.24) 式等を用いて任意の点 x での [T] を計算することになる。

5.4.4 実線路における強制冷却の検討^{65), 67)}

前節の解析法を用いて、実際の線路に強制冷却を適用した場合の検討結果を述べる。

対象線路は、275kV1×1200mm²アルミ被OFケーブル3回線から成っており、布設寸法、周囲土壌の条件は、表 5.6 のとおりである。冷却を検討した線路の全長は 3673m であり、この間は、埋設寸法や土壌の条件の異なる 21 の区間に分割される。

強制冷却をしない場合の各区間での許容送電容量を求めたものが図 5.10 である。

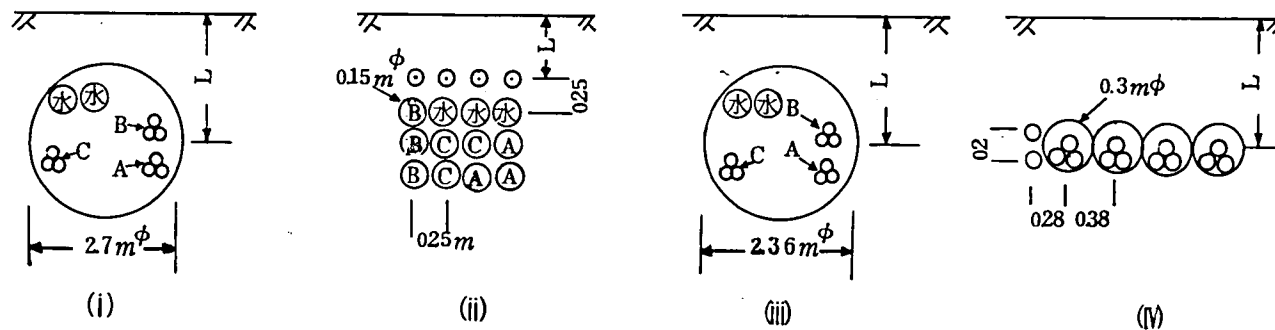
この場合、周囲土壌条件の設計値として、土壌固有熱抵抗: 90℃・cm/watt, 土壌基底温度: 25℃を一定値として用いているが、各区間の管路布設寸法が異なるため、各区間によってケーブル導体温度が、85℃に達する送電容量は、かなり異なる値となっている。線路全体の送電容量は全区間を通しての最低値の送電容量により決定され、220MVA/回線となる。

本例では、送電系統の構成上、3回線で1000MVAの容量を持たせる必要があるため、1回線当り、330MVAが要求される。この送電容量を満たすのは、図 5.10 中の 2 区間のみであるため、全長にわたる強制冷却を実施しなければならない。

表5.6 対象区間の布設寸法及び土壌条件

		人孔番号																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
区 間 長(m)		180	126	145	204	207	214	135	7 0	207	189	172	237	145	208	232	146	177	115	241	184	139	
積算距離 (m)		180	306	451	655	862	1076	1211	1281	1488	1177	1949	2086	2231	2439	2671	2817	2994	3109	3350	3534	3673	
管路配置 ※		(i)	(ii)					(iii)	(ii)													(iv)	
深 さ L(m)		6.8	4.7	3.7	8.6	7.8	6.7	2.0	5.6	3.3	2.0	1.5	4.5	1.8	6.0	7.0	4.6	2.4	2.0	7.5	6.5	9.0	
設計値	土壌固有熱抵抗 (°Cm/watt)	90																					
	土壌基底温度 (℃)	25																					
実測値	土壌固有熱抵抗 (°Cm/watt)	42						28															
	土壌基底温度 (℃)	18			22			18					23			18							

注) ※管路配置は下記のとおり。



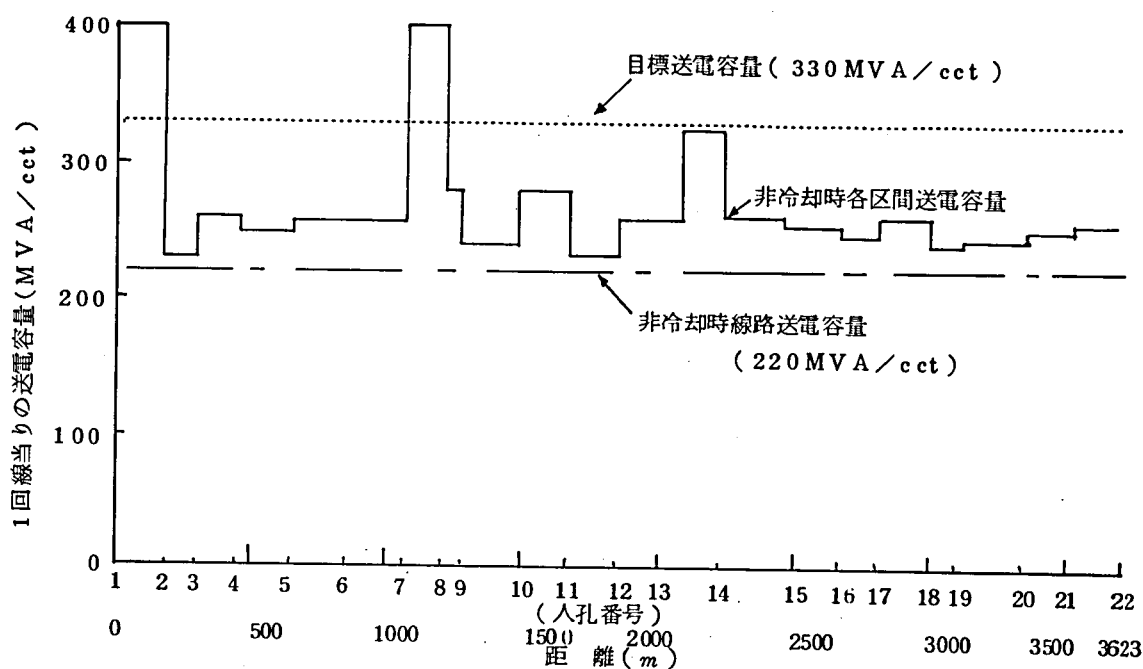


図 5.10 非冷却時の各区分送電容量

以下に実測結果とその解析結果を述べる。

表 5.6 の定数をもとに、本線路の冷却系統を設計し、実線路に適用した場合の実測値と対比させ、設計の妥当性を検証する。

実測に際しては、入口水温 23°C 、流量 5 l/s の冷却を約 3 ヶ月間実施し、温度上昇が、ほぼ飽和した後の各部の温度を測定した。

各部温度の測定結果は図 5.11 となり、同図中に記した同一条件下での理論計算値と良い一致を示している。

この結果から、各部熱定数を用いて理論解析を行うことにより、多区分、多条の強制冷却系統の設計が可能であると判断できる。

本線路は、最終的には入口温度 30°C 、流量 4 l/s の冷却条件に於て、 330 MVA/回線 の容量を確保することが要求されているが、このような条件下で、冷却水温度とケーブル導体最高温度を予測したものが図 5.11 に併記されている。土壌基底温度 25°C 、土壌固有抵抗 $90^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm/watt}$ という設計条件下において、許容導体温度 85°C を越える場所はなく、目標が達せられている。

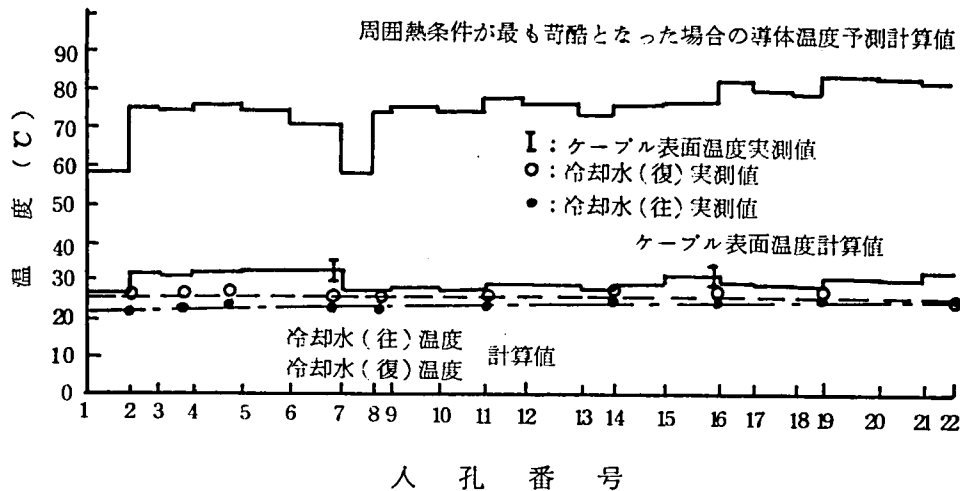


図 5.11 直接水冷時のケーブル温度と水温
(実測値と計算値の比較)

5.5 ま と め

運転状態のケーブルの温度を正確に予測することは、ケーブルの信頼性を増すとともにその効率的運用を可能にする。とくに、今後の超高圧ケーブル系統のほとんどが大容量送電用として使用されることを考えるとき、温度上昇の適確な把握と強制冷却の採用は欠かすことのできない事柄である。その両者に対し、新たな解析及び設計手法を開発し、実測値との対応を含めて十分実用線路に活用できることを見出した。

得られた結果の主要点は以下の通りである。

- (1) 土中埋設多条ケーブルの温度上昇は、熱抵抗と熱容量の組み合わせからなら4段のCR回路により近似できることを示した。
- (2) 等価回路の定数はケーブル本体並びに埋設条件から一定の方式により容易に求め得る。
- (3) 周期的な変動負荷に対するケーブルの温度変化を、上記等価回路を用いることにより正確に求め得る手法を開発した。
- (4) 従来法では過大又は過少評価しがちであったケーブル温度上昇を新方法により算出することにより、安全且つ効率良いケーブルの設計及び運転を可能とした。
- (5) 実線路に適用し得る多条、多区間の強制冷却の解析方法を導いた。
- (6) 実測結果との対比により、本手法が実線路において十分成立することを確認した。

今後の超高圧大容量地中送電系統に於て、本文に導いた温度上昇計算法と強制冷却解析法は、ますますその効果を発揮すると期待できる。

第 6 章 結

言

以上、超高圧 OF ケーブルの絶縁性能向上に関する研究結果を述べた。これをまとめると以下のとおりである。

- (1) 高気密度脱イオン水洗紙と合成絶縁油の採用及び段絶縁設計手法の導入により、低誘電体損で高絶縁耐力を有する超高圧 OF ケーブルの絶縁設計が可能となった。
- (2) その効果は試作 275 kV OF ケーブルを用いた実証的研究により確認され、都市内導入用 275 kV OF ケーブルの設計と製造に活用された。
- (3) 275 kV OF ケーブルの実用化経験を基礎として 500 kV OF ケーブルを開発し、長期間にわたる実証試験により良好な絶縁性能を有することを確認した。この結果は直ちに実用ケーブルに適用され、世界初の 500 kV アルミ被 OF ケーブルとして実用線路に使用されている。
- (4) 直流ケーブルに関しては、電位分布や空間電荷蓄積など交流ケーブルとは根本的に異なる絶縁特性を把握し、これを踏まえた設計製造上の問題及びその解決策が明らかにされ、直流 OF ケーブルの絶縁設計手法の基礎が確立された。
- (5) 直流 500 kV OF ケーブルを開発し、UHV 直流 OF ケーブルの絶縁設計と絶縁性能を明らかにした。とくに絶縁設計上の要点となる異常電圧重畳時の絶縁耐力を追求し、系統保護レベルに対するケーブルの所要絶縁レベルの考え方を提案した。
- (6) 直流 250 kV、500 kV OF ケーブルの開発結果が活用され、我国初の 250 kV 直流 OF ケーブルが設計、製造された。
- (7) 運転中の超高圧ケーブルは、異常な温度上昇により絶縁性能に致命的な損傷を受けることから、熱的要因による絶縁破壊現象を検討し、交流、直流 OF ケーブルの熱破壊現象を理論的、実験的に解明した。この結果は現在の超高圧ケーブルの設計に反映されている。
- (8) 実用線路に発生する変動負荷に対するケーブルの温度上昇計算方法及び送電容量増加のための強制冷却解析手法を導くことにより超高圧 OF ケーブルの安全且つ効率良い運転が可能となった。
- (9) これらの結果はいずれも超高圧電力ケーブルの設計と製造及び線路設計に適用され、我国地中送電ケーブルの実用面に寄与している。

以 上

謝

辞

おわりに、本研究の実施に当り、御懇篤なる御指導を賜った、京都大学教授・林宗明博士に厚く御礼申し上げるとともに、有益な御助言、御鞭撻を賜った、京都大学教授・上之園親佐博士に心からの謝意を表します。

また、この研究の遂行と発表を許可頂き、終始激励と御教示を頂いた日立電線（株）水上徳五郎社長、山路賢吉取締役元研究所長、橋本博治取締役日高工場長兼前研究所長をはじめ、依田文吉電線研究所長、永野宏郎電線研究所副所長、沼尻文哉研究部長に深く御礼申し上げます。

さらに、本研究は電線研究所第1部及び日高工場電力ケーブル部の各位の多大の御協力を得て完成したものであることを記し、感謝の意を表します。

引 用 文 献

- 1) 齊藤, 武共編: 「電気絶縁紙」 コロナ社 昭-44
- 2) JEC 169 「OFケーブル高電圧試験法」 昭-40
- 3) 加賀谷: 「超高压送電」 日刊工業新聞社 昭-36
- 4) 下山田, 常松: 日立評論 36, 1823, 昭-39
- 5) M Kurtz: Ontario Hydro Research Quarterly, Second Quarter, 1, 1967
- 6) 遠藤: 電気学会東京支部大会 №103 昭-45
- 7) 安藤: 「超高压OFケーブルの実負荷試験」 日立評論, 52-4, 52, 昭-45
- 8) 坂本, 深川, 梶本, 安藤「275kV OFケーブル課通電に伴う誘電正接の推移」 電力中研技報 70083 昭-46
- 9) AEIC-EEI-Manufacturers Steering Committee: Field Research on 345kV Underground Cable IEEE Trans. PA&S, 85, 316 (1966)
- 10) 安藤, 安倍, 齊藤「275kV パイプ型OFケーブルの実負荷試験」 電気四学会連合大会 №990 昭-44
- 11) N. Ando: Field Testing of EHV Cable Hitachi Review, 19-3, 243, 1970
- 12) 村串, 天野, 梶本, 安藤「管路布設275kVアルミ被OFケーブルの負荷変化にともなうマンホール内の移動とシースの歪」 電力中研技報 69046 昭-45
- 13) 遠藤, 沼尻: 「超高压OFケーブルの誘電特性に関する二, 三の考察」 日立評論 53-8, 773, 昭-47
- 14) 坂本, 村串, 深川, 安藤: 「275kV アルミ被OFケーブルの事故電流通電時の諸現象」 電力中研技報 69576 昭-44
- 15) 網野, 千葉, 安藤: 「500kV パイプ型OFケーブルの電気特性」 電気学会連合大会 №975, 昭-44
- 16) 渡辺, 林田, 安藤: 「500kV $1 \times 2000 \text{ mm}^2$ OFケーブルの試験結果」 電気学会連合大会 860, 昭-45
- 17) 渡辺, 林, 網野, 林田, 安倍, 沼尻, 安藤, 武井: 「500kV OFケーブルの開発」 電気学会四連合大会 1098, 昭-46
- 18) 渡辺, 林, 林田, 井出, 安藤, 沼尻「500kV OFケーブルおよび付属品の開発」 日立評論 54-4, 355, 昭-47
- 19) 沼尻, 安藤: 「500kV OFケーブルの基本試験の考え方」 電気学会連合大会, №18 昭-49

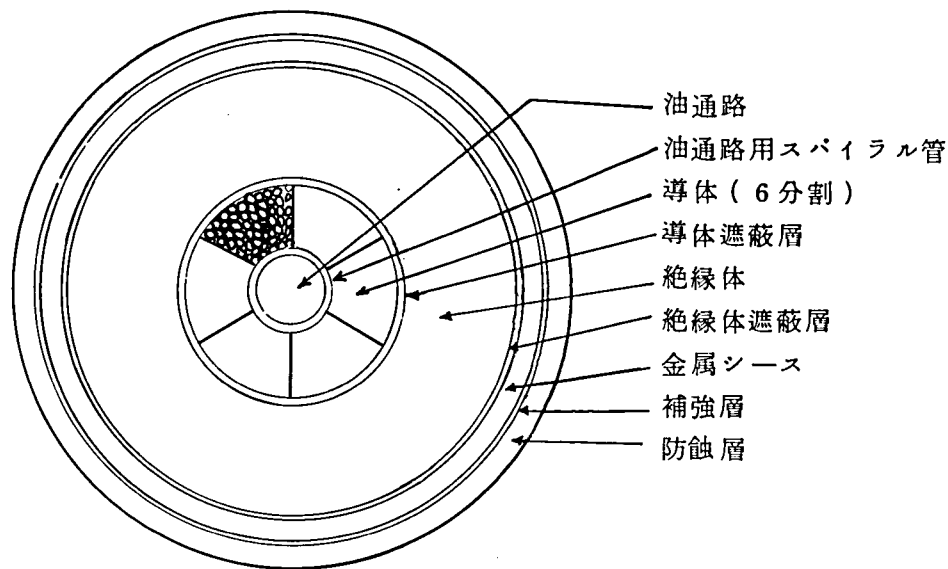
- 20) 安藤, 沼尻: 「パイプ型OFケーブル過渡油圧の実験的検討」 電気学会東京支部大会
№340, 昭-43
- 21) 安藤, 沼尻: 「パイプ型OFケーブル過渡油圧変化の理論検討」 電気学会東京支部大会,
№341, 昭-43
- 22) 安藤, 沼尻: 「高油圧パイプ型OFケーブルの負荷遮断時の絶縁体半径方向の油圧降下」
日立評論 51-11, 1036, 昭-44
- 23) 金子, 深沢, 井出, 安藤, 熊沢: 「66kV OFケーブル用簡易型接続箱の開発」 日立
評論, 53-6, 576, 昭-46
- 24) 金子, 佐藤, 安藤, 熊沢, 井出, 沼尻: 「154kV OFケーブル用改良型普通接続箱」
日立評論, 54-4, 361, 昭-47
- 25) 金子, 加藤, 井出, 安藤: 「154kV OFケーブル用油止接続箱の簡素化」 電気学会
全国大会 №822, 昭-47
- 26) 安生, 前野, 五味, 安藤, 井出, 沼尻: 「275kV OF用セミプレハブ型低熱抵抗接続
箱の開発」 電気学会全国大会 №883, 昭-49
- 27) 安藤, 皆藤, 小林, 井出, 沼尻: 「275kV OF用油止接続箱の開発」 電気学会全国
大会 №1110, 昭-50
- 28) 小杉, 大島, 佐藤, 安藤: 「275kV OFケーブル用縮小型油止接続箱の開発」 日立
評論, 57-11, 937, 昭-52
- 29) 渡辺, 片上, 岡, 沼尻: 「500kV OFケーブルの長期実証試験」 日立評論, 57-
11, 937, 昭-50
- 30) T.Watanabe, K.Katakami: "Long-Term Proof Test of 500kV Self-Con
tained Oil-filled Cable System" Hitachi Review 24, №11, 429,
1975
- 31) 門井, 中挾, 安藤, 皆藤, 林田: 「500kV OFケーブルの長期実証試験後の諸特性」
電気学会全国大会 №1143, 昭-54
- 32) 渡辺, 佐藤: 「東京電力(株)補ヶ浦発電所向け500kVアルミ被OFケーブル」 日立評
論, 56-10, 1013, 昭-49
- 33) 安藤, 遠藤, 沼尻: 「超高圧直流ケーブルの絶縁性能」 日立評論, 54-10, 903,
昭-47
- 34) N.Ando, T.Endo and F.Numajiri: "Insulation Performance of EHV
DC Oil-filled Cable" Hitachi Review, 22-7, 317, 1973
- 35) 安藤: 「直流ケーブル破壊電圧の温度特性」 電気学会東京支部大会 №319, 昭-
44

- 36) 安藤, 遠藤, 沼尻: 「架橋ポリエチレンケーブルの熱刺激電流」 電気学会絶縁材料研究会 IM-74-7, 昭-49
- 37) 安藤, 花野, 沼尻: 「直流OFケーブルの絶縁性能」 電気学会, 絶縁材料シンポジウム, IV-7, 昭-48
- 38) W. Breilmann: ETZ Bd. 95, 1974
- 39) 安藤, 遠藤, 沼尻: 「超高圧直流ケーブルの絶縁特性」 日立評論 53-4, 95, 昭-46
- 40) 安藤, 遠藤, 沼尻: 「250kV直流OFケーブルの絶縁破壊特性」 電気学会全国大会 №781, 昭-47
- 41) N. Ando, T. Endo and F. Numajiri "Insulation Properties of EHV DC OF Cables" Hitachi Review, 21-4, 157, 1972
- 42) G. Bahder, F. G. Garcia and A. S. Brooks Insulation Co-ordination in H. V. DC Cables CIGRE Report 21-03, 1972
- 43) 安藤, 花野, 安倍, 林田, 沼尻: 「500kV直流OFケーブルの開発」 日立評論 56-2, 151, 昭-49
- 44) N. Ando, H. Harano, H. Abe, K. Hayashida and F. Numajiri "Development of 500kV DC Oil-filled Cable" Hitachi Review, 23-12, 469, 1974
- 45) 安藤, 花野: 「500kV直流OFケーブルの絶縁性能」 電気学会全国大会 №1176, 昭-48
- 46) CIGRE SC-21: "Recommendation for tests on d. c. cables for a rated voltage up to 550kV" ELECTRA, №32, January, 1974
- 47) 今城, 坂本, 深川, 鈴木, 吉田, 安藤, 荒木, 宮内: 「直流±500kV OFケーブルの絶縁性能(1)」 電力中研技報, 73124, 昭-49
- 48) 同上, 第2報, 電力中研技報, 177028, 昭-53
- 49) N. Ando, S. Ide and F. Numajiri: "Field Tests of ±500kV DC Oil-filled Cable" Hitachi Review 27, 39, 1978
- 50) N. Ando, F. Numajiri: "Experimental Investigation of Space Charge in XLPE Cable with Cross-cut Dast Figure" Electrical Insulation, IEEE, EI-14, 36, 1979
- 51) 安藤: 「電力ケーブルの熱破壊現象の解析」 電気学会論文誌 93-B, №12, 589, 昭-48
- 52) 安藤: 「電力ケーブルの熱破壊現象の解析」 電気学会東京支部大会 №366, 昭-42

- 53) S.White head : "Dielectric Phenomena Ⅲ" 226, 1932
- 54) L. Brazier, et al, J IEE, 27, 104, 1936
- 55) H. Heumann, Archiv fir Electrotechnik XL7, 398, 1952
- 56) 深川, 今城 : 「超高压ケーブルに於ける熱的不安定現象に関する一考察」 電気学会全国大会 №1119, 昭-46
- 57) 安藤, 沼尻 : 「直流ケーブルの熱破壊現象に関する一考察」 電気学会四連合大会 №866, 昭-45
- 58) 日本電線工業会 JCS 168-C, 1978
- 59) J. H. Neher "The Temperature Rise of Burried Cables and pipes" Trans AIEE, 68 Part 1, 9, 1949
- 60) IEC : "Calculation of the Continuous Current Rating of Cables" Publication 287, 1969
- 61) CIGRE SC-21 : "Current Ratings of Cables for Cyclic and Emergency Loads" ELECTRA, 63, 1972
- 62) 安藤, 沼尻 : 「変動負荷に対するケーブルの温度上昇」 電気学会東京支部大会 №317, 昭-44
- 63) 斉藤, 安藤, 沼尻 : 「周期変動負荷によるケーブルの温度上昇」 電気四学会連合大会 №896, 昭-45
- 64) S. Hayashi "Periodically Interrupted Electric Circuits" Denki-Shoin, 1961
- 65) 谷沢, 小川, 菅野, 岩崎, 金丸, 富田 : 「管路間接水冷方式によるOFケーブルの送電容量増大」 日立評論 59-10, 869, 昭-52
- 66) 安藤, 金丸「強制冷却線路の過渡温度上昇の解析」 電気学会全国大会 №1228, 昭-52
- 67) 末吉, 宮崎, 渡辺, 安藤 : 「どう道布設ケーブルの温度上昇と風冷効果」 電気評論 57-12, 1443, 昭-47

付録Ⅰ 超高圧OFケーブルの構造と寸法例

下図は代表的な超高圧OFケーブルの構造を示しており、本文の記述に於ては図中の名称を用いる。また、次頁付表には導体サイズを1200mmとした場合の代表的寸法例を示す。



名 称	機 能 或 い は 構 成
油 通 路	ケーブル長さ方向の油の通路12～24mm径
油通路用スパイラル管	油通路確保のためのスパイラル状金属帯
導 体	1～3mm径の素線 撚合わせ、表皮効果低減のため分割
導 体 遮 蔽 層	導体円形保持用金属テープ及びカーボンブラック紙
絶 縁 体	80μm～200μmの絶縁紙テープ
絶縁体遮蔽層	カーボンブラック紙及び金属シース間とのクッション層
金 属 シ ー ス	鉛またはアルミの押出し、アルミの場合は波付
補 強 層	主として鉛シースの場合の耐内圧用金属テープ
防 蝕 層	ビニルまたはポリエチレン押出し

代表的な超高圧OFケーブルの構造例

代表的な O F ケーブルの構造例

項 目 \ 送電圧 (kV)	154	275	500
導 体 サ イ ズ (mm^2)	1,200	1,200	1,200
油 通 路 径 (ϕ_{mm})	14	14	18
導 体 外 径 (ϕ_{mm})	47.2	47.2	47.9
導体バインダ層厚さ (mm)	0.5	0.5	0.5
絶 縁 厚 (mm)	13.5	19.5	30.0
遮 蔽 層 厚 (mm)	0.8	0.8	0.8
ア ル ミ 被 厚 (mm)	2.2	2.4	2.8
防 蝕 層 厚 (mm)	4.5	6.0	6.0
概 算 外 径 (ϕ_{mm})	100	117	141
概 算 重 量 (kg/m)	20.2	23.9	29.9

付録Ⅱ 高油圧パイプ型 OF ケーブルの負荷遮断時の 絶縁体半径方向油圧降下

1. は し が き

高油圧パイプ形 OF ケーブル（以下 POF と略称）は、その構造から明らかなように、絶縁体遮蔽上にケーブル輸送・布設時の吸湿と脱油を防止するための防湿層があるが、これを通して油が絶縁体内へ浸透することによりパイプ側の油圧が導体内部に伝えられている。しかも、油の粘度が高いため、負荷電流が変化して導体部分が熱膨張ないし熱収縮するとこれに即応した絶縁油の吸収・補給ができず、導体部分の油圧が一時的に上昇ないし下降する。とくに大きい負荷が遮断された場合には導体側油圧降下も著しく、その度合いによってはケーブルの電気的性能に悪影響を及ぼすことになる。導体側油圧低下を生ずる最も大きい要素は防湿層が油の浸透を妨げる点にあり、防湿層を設計するときには、吸湿と脱油を防止するという本来の性能だけでなく、負荷遮断時の油圧低下という逆の効果もじゅうぶん考慮しなければならない。

ここに防湿層の構造と負荷遮断時の導体油圧降下の関係について実験的および理論的に検討した結果を報告する。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

2. 試作ケーブルによる実験

防湿性の異なった 2 種の試作ケーブルにより負荷遮断時の導体側油圧変化を実測し、変化状況・最低油圧値などを比較検討した。

2.1 試料ケーブル

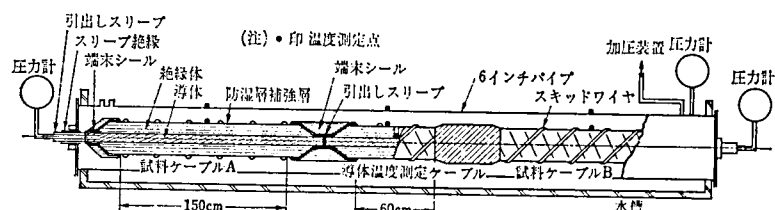
防湿層の構造のみが異なる 2 種の 230 kV、1,250 mm² POF ケーブルを試作した。その構造の大略と使用絶縁油の粘度は付表 1 に示すとおりである。なお、これらのケーブルについて本実験と並行して 3～6 ヶ月にわたる長期の輸送・保管実験を実施し、防湿層 2 層構造のほうが脱油と吸湿に対する特性がすぐれていることを確認している⁽⁴⁾。

2.2 試験装置

試験装置を付図 1 に示す。試料ケーブル A、B および導体温度測定用ケーブルを 6 インチパイプに引き入れ、さらに全体を水そう内に収めた。試料ケーブルの片端は油圧の伝達を遮断するようにした中間接続スリーブで導体温度測定用ケーブルに接続し、他端は導体引出スリーブによりパイプ外に引き出した。この引出スリーブの中心に油通路があって導体油圧が測定できるようになっている。なお、ごくわずかな油量が導体油圧の測定誤差となるので、スリーブ部分は粘着性シリコンゴムテープで完全にシールし、さらに後

付表 1 試料ケーブルの構造ならびに絶縁油の特性

ケーブル種類 項 目		試料ケーブル (A) 防 湿 層 1 層	試料ケーブル (B) 防 湿 層 2 層
導 体 (1, 2 5 0 mm^2 4 分割)		4 5.7 $\text{mm} \phi$	4 5.7 $\text{mm} \phi$
絶 縁 体 (脱 イ オン 水 洗 紙)		2 1.3 mm	2 1.3 mm
遮 蔽 層		0.3 mm	0.3 mm
防 湿 層 (金属化 マイラ 2 枚 / 層)		0.1 3 mm	0.2 6 mm
補 強 層 (銅 テープ ・ マイラ)		0.1 8 mm	0.1 8 mm
ス キ ッ ド ワ イ ヤ		5.1 \times 2.5 4 mm	5.1 \times 2.5 4 mm
含浸油 (ポリブデン油) の 粘 度	1 0 0 $^{\circ}\text{F}$	1,0 2 0 センチストークス	
	2 1 0 $^{\circ}\text{F}$	3 4.5 "	
パイプ油 (鉱 油) の 粘 度	1 0 0 $^{\circ}\text{F}$	1 6 8 "	
	2 1 0 $^{\circ}\text{F}$	1 0.6 "	



付図 1 負荷遮断時の導体油圧変化測定用試験装置

述のように微少油量で作動する圧力ゲージを使用した。

2.3 試験方法ならびに条件

パイプ油圧および周囲温度を一定に保ちながら温度分布が定常状態となるまで導体に一定電流を通電する。その後、電流を遮断して各部の温度、油圧変化を測定する。

導体油圧低下の原因が短時間の温度降下幅とパイプ周囲温度に依存すると考えると、実線路で最も過酷な状態となるのはパイプが大気中に露出された部分であろう。この意味から試験条件として付表 2 に示すものを選んだ。すなわち、試験 № 1 は通常の負荷遮断を、№ 2 は冬期の最大負荷遮断を、また № 3 は通常の過負荷遮断を想定したものである。

付表 2 試 験 条 件

試験 №	通 電 電 流 (A)	パイプ冷却方法	目 標 温 度 (℃)	
			導 体	パ イ プ
1	1,600	水 道 水	50	20
2	1,600	氷 水	30	0
3	2,000	水 道 水	70	20

2.4 試験結果ならびに考察

各条件における電流遮断後の温度・油圧の測定結果を付図 2 に示す⁽⁵⁾。これより以下の点が明らかになった。

〈防湿層構造による差〉 予想されたように防湿層 2 層の B ケーブルのほうが導体の到達最低油圧は低くなるが、A ケーブルとの差は 1 kg/cm^2 程度である。また、最低値に到達する時間は B ケーブルのほうが早く、A ケーブルの約 80% である。

〈試験条件による差〉 導体油圧低下は温度変化幅（遮断負荷に関係する）よりはパイプ温度（周囲大気温度）に強く影響される。すなわち、冬期の負荷遮断が最も過酷な条件となる。

ただし、ここに想定した負荷電流は非常に大きく、実際には土中埋設部の温度上昇で制限を受けるので、実線路の条件では $800 \sim 1,200 \text{ A}$ が妥当であると思われる。一方、油圧ゲージの体積変化は $0.05 \text{ cm}^3/\text{kg}$ であり、熱収縮による導体部の体積変化よりはるかに小さいので導体油圧変化には影響しないであろう。なおこれらについてはあとで検討する。

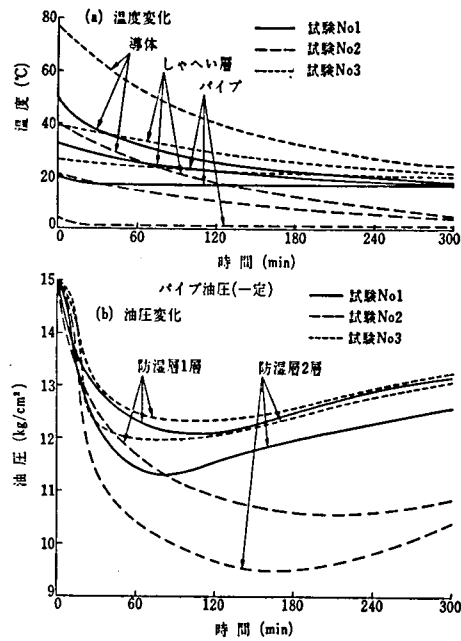
3. 補 助 実 験

2 で得た実験結果を理論的に解析する前に、導体油圧変化の基礎実験を行なった。

3.1 一定温度下における過渡油圧変化

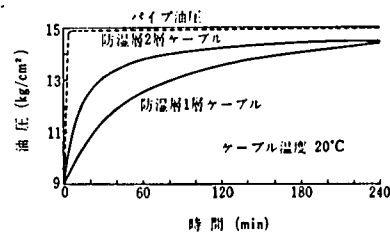
付図 1 の試験装置を一定温度 (20°C)、一定圧力 (15 kg/cm^2) に保持したのち、導体側から瞬間的に微量の油を流出させ、導体油圧を約 9 kg/cm^2 に下げ、その後の導体油圧の回復特性を測定した。A, B 両ケーブルの導体油圧の回復状況は付図 3 に示すとおりである。

あとで述べるように、B ケーブルの方が絶縁体半径方向の油流抵抗が高く、油が浸透しにくいにもかかわらず、導体油圧の回復は早くなっている。逆にいえば、導体油圧を回復させるのに必要な、外側から浸透すべき油量は B ケーブルでは少なくすむということである。この原因として種々考えられるが、防湿層のテープ巻き張力が絶縁紙巻き張力より



付図2 負荷遮断時の温度ならびに油圧変化測定結果

も高いので、防湿層数の多いBケーブルのほうが、全体として締めつけられ、より線導体付近の油のスペースが小さくなったためであろうと推定される。



付図3 一定温度下における導体油圧回復特性

3.2 ケーブル絶縁体半径方向の油流抵抗

やはり図1の装置を用い、温度、パイプ側油圧を一定に保ちながら大気圧 (1kg/cm^2) に開放された導体側に流出する油量を測定し、次式を用いて絶縁体半径方向の油流抵抗を求めた。

$$S = \frac{(P_p - P_c)\ell}{q_0} \dots\dots\dots (1)$$

ここに S : 絶縁体半径方向油流抵抗 ($\text{kg} \cdot \text{h}/\text{cm}^4$)

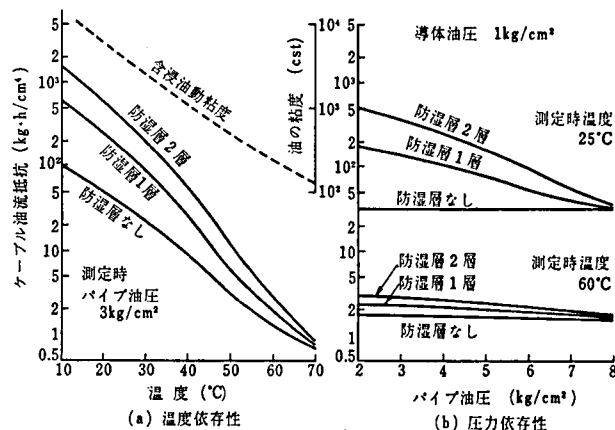
P_p : パイプ側油圧 (kg/cm^2)

P_c : 導体側油圧 (kg/cm^2) ($=1$)

ℓ : 試料有効長 (cm)

q_0 : 半径方向流出油量 (cm^3/h)

付図4はA, B両ケーブルおよび防湿層をはいだケーブルの油流抵抗を示したもので、(a)は温度特性、(b)は圧力特性である。



付図4 ケーブル絶縁体半径方向の油流抵抗

従来、油流抵抗は油の粘度に依存するので、その温度依存性は油の粘度—温度特性の傾向と一致し、圧力にはよらないとされてきた。しかし、付図4(a)中の粘度—温度特性と比較すれば明かなように、防湿層のあるA, B両ケーブルでは油流抵抗は粘度以上に温度により変化しており、また(b)図から圧力の影響も受けることが判明した。以上、二つの補助実験により、導体油圧変化を理論的に取り扱うには

- (1) ケーブル中の油の容量が油圧変化に大きく影響すること。

(2) 絶縁体半径方向の油流抵抗は温度、油圧により非線形の変化を示すこと。
の2点を考慮する必要のあることが判明した。

4. 理論的解析

ケーブル絶縁体内部の油圧伝播現象を熱伝達回路と類似の等価回路で表示し、油圧変化の解析を行った。回路定数は前述の補助実験より決定される。

4.1 導体油圧変化の近似解

絶縁体内部の油圧変化に関する理論方程式を立てることは容易であるが、非線形連立微分方程式となり解析的な解を導くことはできない。このため、これまで種々の仮定において最も問題となる最低油圧のみを近似的に求めることが試みられているが⁽⁶⁾⁽⁷⁾、負荷遮断時の導体油圧変化全体はじゅうぶん説明されていないように思われる。そこで筆者は、絶縁体内の油圧伝播の等価回路を導き、油圧の時間変化をも含めた解析を試みた。

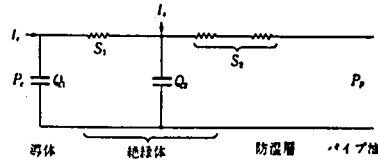
4.2 油圧伝播の等価回路

ケーブルを構成する導体、絶縁体部の材料の圧縮率は非常に小さく無視できるほどであるが、これらを組み合わせたケーブルとしての圧縮率を無視すると付図3の実験結果は点線のようになるはずであり、明らかに実測値と異なっている。この差はケーブルとしての圧縮率が無視できないものであることを示しており、導体より線構造と絶縁体積層構造のためケーブルがいくぶん変形し、これがみかけ上圧縮率となって表われると考えられる。

すなわち、ケーブル導体部、絶縁体部には被圧縮性の要素（静電容量、熱容量に相当して油容量といえるもの）を含んでいるとみなされる。

一方、半径方向の油の流れに対しては防湿層と絶縁紙の油流抵抗が存在する。

これら油容量と油流抵抗を組み合わせてケーブル半径方向の油圧伝播等価回路として付図5に示すものを仮定した。流入する油量は各部の温度変化と膨張係数によって与えられる。



Q_1, Q_2 : 導体部、絶縁体部等価容量 ($\text{cm}^3/[(\text{kg}/\text{cm}^3)\text{cm}]$)
 S_1, S_2 : 絶縁体部、防湿層油流抵抗 ($(\text{kg}/\text{cm}^3)/[(\text{cm}^3/\text{h})/\text{cm}]$)
 P_c, P_p : 導体、バイプ油圧 (kg/cm^2)
 I_c, I_i : 導体部、絶縁体部熱膨張速度 ($(\text{cm}^3/\text{h})/\text{cm}$)

U_1, U_2 : 導体部、絶縁体部等価容量 ($\text{cm}^3/(\text{kg}/\text{cm}^3)\text{cm}$)
 S_1, S_2 : 絶縁体部、防湿層油流抵抗 ($(\text{kg}/\text{cm}^3)/(\text{cm}^3/\text{h})/\text{cm}$)
 P_c, P_p : 導体、バイプ油圧 (kg/cm^2)
 M_c, M_i : 導体部、絶縁体部熱膨張速度 ($(\text{cm}^3/\text{h})/\text{cm}$)

付図5 POFケーブルの絶縁体半径方向の油圧伝播等価回路

4.3 等価回路による解析

付図5の等価回路と定数を用いれば、バイプ側油圧を一定に保ちながら負荷を遮断した場合の導体側油圧は次のようにして求めることができる。

すなわち導体側油圧 P_c が一定のバイプ側油圧 P_p と絶縁体部分による変化分 P の重畳であるとする。 P はいわゆるCR回路の過渡電圧と同様にして次の微分方程式を解くことにより求められる。

$$P_c = P_p + P \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$U_1 U_2 S_1 S_2 \frac{d^2 P}{dt^2} + \left\{ U_1 U_2 S_2 \frac{d S_1}{dt} + U_1 S_1 + U_1 S_2 + U_2 S_2 \right\} \frac{d P}{dt} + P - U_2 S_2 \frac{d S_1}{dt} M_c - U_2 S_1 S_2 \frac{d M_c}{dt} - (S_1 M_c + S_2 M_c + S_2 M_i) = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{ここに、} M_c = r_c \frac{dT_c}{dt}, \quad M_i = r_i \frac{dT_i}{dt} \quad \dots\dots\dots (4)$$

r_c : 導体部熱膨張係数 ($(\text{cm}^3/^\circ\text{C})/\text{cm}$)

r_i : 絶縁体部熱膨張係数 ($(\text{cm}^3/^\circ\text{C})/\text{cm}$)

T_c, T_i および T_p : 導体、絶縁体およびバイプ温度 ($^\circ\text{C}$)

ただし、油流抵抗が温度と圧力に依存し、これらが時間とともに変化するので、(3)式には $d S_1 / dt$ の項が含まれてくる。上記以外の記号は付図5に示されている。

油流抵抗 S_1, S_2 は先の補助実験から次式で近似することができる。

A ケーブル

$$S_1 = 111 \times 10^{-0.033 T_c}$$

$$S_2 = 111 \times 10^{-0.033 T_c} (1 + 10^{1.706 - 0.285 (P_p - P_c)} - 0.012 T_s) \quad (5)$$

B ケーブル

$$S_1 = 111 \times 10^{-0.033 T_c}$$

$$S_2 = 111 \times 10^{-0.033 T_c} (1 + 10^{2.115 - 0.286 (P_p - P_c)} - 0.016 T_s) \quad (6)$$

一方、熱膨張係数は各部を構成する材料の膨張率と体積比率から求められる。

$$r_c = 2.20 \times 10^{-3} \quad (\text{cm}^3 / ^\circ\text{C} \cdot \text{cm})$$

$$r_i = 1.995 \times 10^{-2} \quad (\text{cm}^3 / ^\circ\text{C} \cdot \text{cm})$$

さらに、導体、絶縁体の温度変化は、付図5と類似の熱等価回路を用いて計算する方法がすでに明らかにされており、これをそのまま用いた。

$$T_c = (700 - 0.7e^{-2.94t} - 693e^{-0.551t})W + T$$

$$T_i = (400 - 0.9e^{-2.94t} - 413e^{-0.551t})W - T$$

等価油容量 U_1, U_2 は先の補助実験の結果(付図3)と等価回路を用いて次のようにして求められた。すなわち、最初油流抵抗が油圧に依存しない一定値であるとして等価回路から U_1, U_2 の略値を求め、次にこの値を用いて油流抵抗の油圧依存性を考慮して(3)式と類似の方程式を計算機により数値的に解き、導体油圧の回復特性を求めた。この計算結果が付図3の実測値に一致するまで U_1, U_2 を変化させて計算を繰り返し、最終的な U_1, U_2 を決定した。

$$\left. \begin{array}{l} \text{A ケーブル: } U_1 = 0.0611, U_2 = 0.0467 \quad (\text{cm}^4 / \text{kg}) \\ \text{B ケーブル: } U_1 = 0.0134, U_2 = 0.0296 \quad (\text{cm}^4 / \text{kg}) \end{array} \right\} \quad (8)$$

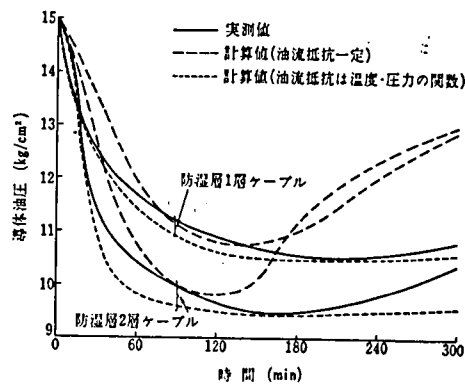
これを材料の圧縮率から求めた圧縮量と比較すると、 U_1 で約2けた、 U_2 で3~4倍大きくなる。油圧ゲージの体積変化を150cmのケーブル長で換算すると $0.0003 \text{ cm}^4 / \text{kg}$ となり、 U_1, U_2 に比べて無視できることがわかる。

4.4 導体油圧変化の計算結果

前節で導いた微分方程式と定数を用いて負荷遮断時の導体油圧変化を計算するに当たってまず簡単化のため油流抵抗が油圧と温度によらないものとみなしてみる。このとき(3)式は線形微分方程式となるので解析的に解け、次式の解を得る。

$$P = Ae^{-\alpha t} + Be^{-\beta t} + Ce^{-\gamma t} + De^{-\delta t} + E \quad (9)$$

導体油圧が最も低下した試験No.2の場合の計算値と実測値を示したのが付図6である。この場合、一定の油流抵抗としては、負荷遮断時の絶縁体温度および最低値到達時の導体・パイプ間油圧差により決まる値を(5)、(6)式から求めて使用した。



付図 6 導体油圧低下の実測値と計算値の比較

次に、油流抵抗が温度、油圧によって変化する場合の計算を行った。この場合、(3)式は非線形微分方程式となり解を解析的に求めることができないので、数値解法の一つである Lunge-Kutha-Gill 法により電子計算機を使用して導体油圧変化を求めた。時間分割は 0.1 分とした。試験条件 No. 2 の場合の計算結果もやはり付図 6 に併記した。

4.5 計算結果の考察

前節の計算結果は試験 No. 2 の場合のみを示したが、ほかの試験 No. 1 および No. 3 の場合も同様の傾向にある。この傾向をまとめると次のようである。

(1) 油流抵抗の温度、圧力依存性を無視した場合

- (a) 最低油圧は実測値のほうが低くなる。
- (b) 最低油圧到達時間は計算値のほうがやや速くなる。
- (c) 最低油圧到達後の油圧回復は計算値のほうが速い。

この原因は、実際には負荷遮断後しだいにケーブル温度が降下するので、油流抵抗はしだいに大きくなるのにこれを無視したためであろう。

(2) 油流抵抗の温度、圧力依存性を考慮した場合

- (a) 最低油圧は実測値と計算値がほぼ一致する。
- (b) 最低油圧到達時間は計算値のほうがやや早くなる。

油圧変化全体としては実測値と計算値がよく一致している。

5. 実験ならびに理論解析結果の検討

先の実験結果から、実線路で遭遇するよりも温度、遮断負荷ともはるかに過酷な条件下においても、防湿層 2 層のケーブルの導体最低油圧は 9 kg/cm^2 以上で電氣的な性能の面から全く問

題ないことがわかった。しかも防湿層1層ケーブルとの差は 1 kg/cm 程度である。したがって、脱油、吸湿に対するすぐれた特性を考慮すると、防湿層として2層構造を有するケーブルのほうが適していると考えられる。なお、実測上の問題としてあげた油圧測定ゲージの体積変化はあとの補助実験結果の解析からも明らかなように、ケーブルの体積変化（等価油容量）に比べて無視できることがわかったのでとくに補正しなかった。

理論解析結果と実測結果を比較すると次のことが言える。予測計算する場合には油流抵抗を仮定しなければならないことなどから計算法自体は複雑になるけれども、油流抵抗の温度、油圧依存性を考慮した計算法のほうが油圧変化の全体がよく一致し、すぐれていると言えよう。しかし、油流抵抗を一定とした計算法は、解を解析的に求めることができるので、ある程度の裕度をもって計算すれば油圧降下を推定するうえに設計上実用的な方法と言えよう。いずれにしても、負荷遮断時の導体油圧変化の解析に当っては純理論式に種々の仮定をおいて解くよりも図5のような等価回路を用いて解いたほうが油圧変化全体がよく説明されとともに計算が簡単になる。ただし、そのためには油流抵抗、油容量などの等価回路定数をあらかじめ定めておく必要がある。

6. む す び

230kV、1,250mm² POFケーブルを対象に負荷遮断時の導体油圧変化について実験・理論両面から検討した。その結果明らかになった点をまとめると次のとおりである。

- (1) POFケーブルの防湿層を従来の1層から2層に増すと絶縁体半径方向の油流抵抗は大きくなるが、最悪条件下でも導体油圧は 9 kg/cm 以上を保ち電気的特性の面からは問題はない。したがって脱油、吸湿に対する特性を勘案すると防湿層を2層としたほうが良いと言えよう。
- (2) 導体油圧変化は油圧伝播等価回路を用い、その回路定数を求めておけば数値計算により求めることができる。

等価回路の定数（油流抵抗および油容量）は今回の実験結果からも明らかなように、ケーブル構造の微少な相違によって大きく変化する。このため現段階でケーブル設計時に厳密な油圧低下を予測することは困難であるが、今後500kV級POFケーブルでは絶縁層が厚くなり、導体油圧低下の問題が大きくなるので、引き続き検討を進める必要がある。

なお、本実験結果をもとにロスアンジェルス市電気水道局向けに防湿層2層構造の230kV、1,250mm² POFケーブルを製造し、既に納入を完了している。⁽⁴⁾

参 考 文 献

- (1) 水上ほか 4 名： 日立評論 48, 1330 (昭 41-11)
- (2) 遠藤ほか 2 名： 日立評論 50, 725 (昭 43-8)
- (3) 依田ほか 3 名： 日立評論 51, 747 (昭 44-8)
- (4) 千葉ほか 2 名： 電学会東京支大, №284 (昭 43-10)
- (5) 網野ほか 2 名： 電学会東京支大, №340 (昭 43-10)
- (6) 寺田ほか 3 名： 電学会連大, №1127 (昭 42-4)
- (7) 小島ほか 2 名： 電学会連大, №985 (昭 44-3)

付録Ⅲ (3.11)式の導出

図3.2の等価回路に於て、直流電圧 V_{DC} を長時間($t \rightarrow \infty$)印加後、電圧が瞬時に V_p に変化した場合を考える。このとき(4.8)式に相当して

$$\left. \begin{aligned} V_p &= V_1 + V_2 \\ I &= p C_1 V_1 + V_1/R_1 - p C_1 V_{10} = p C_2 V_2 + V_2/R_2 - p C_2 V_{20} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

が成り立つ。但し(3.9)より

$$V_{10} = V_{DC} \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad V_{20} = V_{DC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

である。これより

$$V_1 = \frac{p(C_2 V_p - C_2 V_{20} + C_1 V_{10}) + \frac{V_p}{R_2}}{p(C_1 + C_2) + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

すなわち

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \frac{R_1 V_p}{R_1 + R_2} - \frac{(C_1 R_1 - C_2 R_2)(V_p - V_{DC})}{(C_1 + C_2)(R_1 + R_2)} e^{-\frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} t} \\ V_2 &= \frac{R_2 V_p}{R_1 + R_2} + \frac{(C_1 R_1 - C_2 R_2)(V_p - V_{DC})}{(C_1 + C_2)(R_1 + R_2)} e^{-\frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} t} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

以上は、油浸紙層、油隙層に加わる電圧であるが、各々の厚みを a, b 、($a+b=1$)とする

$$E_{DC} = V_{DC}/(a+b) = V_{DC}$$

$$E_p = V_p/(a+b) = V_p$$

$$E_{p1} = V_1/a$$

$$E_{p2} = V_2/b$$

となり、 $R_1 = a\rho_1$ 、 $R_2 = b\rho_2$ 、 $C_1 = \epsilon_1/a$ 、 $C_2 = \epsilon_2/b$ とともに上記(2)式に代入する

$$\begin{aligned} E_{p1} &= \frac{V_1}{a} = \frac{a\rho_1 E_p}{a(a\rho_1 + b\rho_2)} - \frac{(\frac{\epsilon_1}{a} b\rho_1 - \frac{\epsilon_2}{b} b\rho_2)(E_p - E_{DC})}{(a\rho_1 + b\rho_2)(\frac{\epsilon_1}{a} + \frac{\epsilon_2}{b}) \cdot a} e^{-t/\tau} \\ &= \frac{\rho_1 E_p}{a\rho_1 + b\rho_2} - \frac{b(\epsilon_1 \rho_1 - \epsilon_2 \rho_2)}{(a\rho_1 + b\rho_2)(b\epsilon_1 + a\epsilon_2)} (E_p - E_{DC}) e^{-t/\tau} \end{aligned}$$

同様にして

$$E_{p2} = \frac{\rho_2 E_p}{a\rho_1 + b\rho_2} + \frac{a(\epsilon_1 \rho_1 - \epsilon_2 \rho_2)}{(a\rho_1 + b\rho_2)(b\epsilon_1 + a\epsilon_2)} (E_p - E_{DC}) e^{-t/\tau}$$

$$\tau = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} = \frac{a \cdot b \cdot \rho_1 \rho_2 (\epsilon_1/a + \epsilon_2/b)}{a\rho_1 + b\rho_2}$$

となり、本文中の(3.11)式が導かれる。